

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Coexistencia entre los sistemas LTE y DTV
en la banda de 800 MHz**

Marta Domínguez Araujo

Tutor: Basil Taha Ahmed

Junio 2016

Coexistencia entre los sistemas LTE y DTV en la banda de 800 MHz

AUTOR: Marta Domínguez Araujo

TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)

Dpto. de Tecnología Electrónica y de Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Junio de 2016

Resumen

La televisión analógica utilizó, para su emisión, parte de la banda de frecuencia VHF (47 MHz- 230 MHz) y parte de la banda de UHF (470 MHz - 862 MHz). Con la llegada de la tecnología digital, se empleó de forma más eficiente el espectro radioeléctrico, y esto causó la liberación del mismo. A esta parte sobrante se le denominó Dividendo Digital (DD) y se destinó al uso de la telefonía móvil de última generación (4G), ya que en ese momento la prestación de servicios de banda ancha móvil era uno de los fines más demandados.

Para que los ciudadanos pudiesen disfrutar de los nuevos servicios del 4G era necesario disponer de un conjunto de frecuencias contiguas. Por esta razón, y porque tenía mejores propiedades de propagación y penetración en el interior de edificios que las bandas con frecuencias más altas, Europa impuso que el DD ocupara la banda de 800 MHz (790 MHz – 862 MHz).

Una vez que se asignaron las nuevas bandas de frecuencia, se observó que el primer canal del sistema LTE comenzaba en 791 MHz, mientras que el último canal del sistema TDT acababa en 790 MHz, existiendo una separación entre ambos sistemas de 1 MHz. Debido a esta distancia, resulta necesario desarrollar un estudio para concluir qué efecto producen las interferencias entre ambas tecnologías sobre los usuarios que se encuentran en la zona de cobertura de la estación base LTE y si es posible la convivencia entre ambos sistemas.

Para ello, se distinguen dos escenarios: el primer escenario consiste en estudiar el efecto que la señal TDT produce sobre la señal LTE, y el segundo examina las interferencias que causa el sistema LTE sobre el sistema TDT.

Una vez realizadas las simulaciones, en el escenario 1 se ha concluido que a mayor distancia entre las estaciones base transmisoras TDT y LTE menores son las interferencias y mayor es la zona de cobertura, y en el escenario 2 se ha deducido que a menor distancia menor es el efecto entre ambos sistemas. Para evitar el problema en este segundo caso sería necesario aumentar la banda de guarda.

Palabras clave: Dividendo Digital (DD), *Long Term Evolution* (LTE), Televisión Digital Terrestre (TDT), cobertura, coexistencia, banda de guarda

Abstract

Analogic TV used for its emission part of the VHF frequency band (47 MHz- 230 MHz) and part of the UHF frequency band (470 MHz - 862 MHz). Since the digital technology arrival, the radioelectric spectrum has been used in a very efficient way, so that, caused the liberalization of a part of the radioelectric spectrum. This part was known as Digital Dividend(DD), and it was assigned to the fourth generation mobile phone system (4G), because the broadband mobile communication was one of the most demanded services in that moment.

In order that the new 4G services could be enjoyed by the citizens, it was necessary have an adjacent set of frequencies. For that reason, and because it had better propagation and penetration properties inside the buildings than higher frequencies, Europe imposed the 800 MHz band (790 MHz – 862 MHz) for the DD.

Once the new frequencies bands were assigned, it was realized that first channel of the LTE system started in 791 MHz, and the last channel of the TDT system finished in 790 MHz, so that it had a narrow separation between both systems of just 1 MHz. Because of that, it's necessary to develop a study for concluding the effect of the interferences between both technologies over the users found in LTE base station coverage zone and if the coexistence between both systems is possible.

For that, two scenarios are distinguished: the first scenario consists on studying the effect that TDT signal produces on the LTE signal, and the second scenario examines the interferences that LTE system causes on TDT system.

Once simulations have been made, in the first scenario it has been concluded that a greater distance between TDT and LTE transmission base station less interferences and greater zone coverage, and in the scenario 2, it has been deduced that less distance less is the effect between both systems. For avoiding the problem in the second case would be necessary increase the band of guard.

Key Words: Digital Dividend(DD), *Long Term Evolution (LTE)*, Digital Terrestrial Television (TDT), coverage, coexistence, guard band.

Agradecimientos

Quería agradecer en primer lugar a mi tutor, Bazil, por darme la oportunidad de poder hacer un Trabajo de Fin de Grado con él, por ayudarme durante la realización del mismo y por estar disponible siempre que le he necesitado.

Gracias a mis amigos de siempre por estar ahí durante todo este tiempo, por entenderme cuando estaba agobiada y no podía ir a Guadalajara y por apoyarme cuando lo he necesitado.

Gracias a todas esas personas que han estado a mi lado desde que comencé la universidad, y a aquellas que he ido descubriendo a medida que ha ido pasado el tiempo. Gracias por las risas, charlas, quedadas, por aguantarme y escucharme en los momentos no tan buenos. En resumen, gracias por estar ahí. Sin vosotros el tiempo que he pasado tanto dentro como fuera de la universidad no hubiese sido el mismo.

Por último y no menos importante, agradecer a mi familia por todo el apoyo que me habéis dado, la paciencia que habéis tenido y el tiempo que me habéis dedicado. Sin vosotros nada de esto hubiese sido posible.

Índice de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organización de la memoria	2
2	Estado del arte	5
3	Sistemas LTE y TDT	9
3.1	LTE.....	9
3.1.1	Técnicas de Acceso Múltiple: OFDMA y SC-FDMA	10
3.1.2	Esquemas de Modulación	11
3.2	Televisión Digital	13
3.2.1	Sistema TDT	13
3.2.2	Técnica de Modulación COFDM.....	14
4	Coexistencia entre LTE y TDT	17
4.1	Modelo de propagación	17
4.2	Escenarios planteados	18
4.3	Radio de cobertura.....	19
4.4	Efecto del Leakage	21
4.5	Desarrollo del programa	28
4.5.1	Señal TDT interfiere sobre señal LTE	28
4.5.2	Señal LTE interfiere sobre señal TDT	30
5	Resultados	33
5.1	Señal TDT interfiere sobre señal LTE.....	33
5.1.1	Impacto de canal 60 sobre canal A	33
5.2	Señal LTE interfiere sobre señal TDT	36
5.2.1	Impacto de canal A sobre canal 60	36
6	Conclusiones y trabajo futuro	41
6.1	Conclusiones.....	41
6.2	Trabajo futuro	42
7	Referencias.....	43
	Glosario	45
	Anexo A: Parámetros aplicados en estudio	I
	Anexo B: Características antena Yagi.....	III

Anexo C: Señal TDT interfiere sobre señal LTE	V
C.1 Impacto de canal 60 sobre canal B	V
C.2 Impacto de canal 60 sobre canal C	VII
C.3 Impacto de canal 59 sobre canal A	IX
C.4 Impacto de canal 59 sobre canal B	XI
C.5 Impacto de canal 59 sobre canal C	XIII
C.6 Impacto de canal 58 sobre canal A, canal B y canal C	XV
Anexo D: Señal LTE interfiere sobre señal TDT	XVII
D.1 Impacto de canal A sobre canal 59	XVII
D.2 Impacto de canal A sobre canal 58	XIX
D.3 Impacto de canal B sobre canal 60	XXI
D.4 Impacto de canal B sobre canal 59	XXIII
D.5 Impacto de canal B sobre canal 58	XXV
D.6 Impacto de canal C sobre canal 60	XXVI
D.7 Impacto de canal C sobre canal 59	XXVIII
D.8 Impacto de canal C sobre canal 58	XXIX
Anexo E: Características antena transmisión TDT	XXXI
Anexo F: Características antena LTE estación base	XXXIII
Anexo G: Modulación según SINR mínima (LTE)	XXXV
Anexo H: Modulación según SINR mínima (DTV)	XXXVII

Índice de Figuras

Figura 1.Dividendo Digital (DD)[6]	1
Figura 2.Canales próximos de TDT y LTE en la banda de 800 MHz [7]	2
Figura 3.Mapa de Regiones determinada por la ITU [8]	5
Figura 4.Estándares de Televisión Digital Terrestre [9]	6
Figura 5.Asignación de subportadoras OFDM Y OFDMA [10].....	11
Figura 6.Diagrama de constelación de QPSK [11]	12
Figura 7. Diagrama de 16 QAM [11].....	13
Figura 8. Diagrama de 64 QAM [11].....	13
Figura 9.Ecos producidos por múltiples caminos de la señal en su propagación [12]	15
Figura 10.Escenario 1: señal TDT interfiere sobre señal LTE.....	18
Figura 11.Escenario 2: señal TDT interfiere sobre señal LTE.....	19
Figura 12.Representación del efecto del leakage del sistema LTE sobre el sistema TDT [13] ..	21
Figura 13.Máscara de transmisión TDT con un ancho de banda de 8MHz [14].....	22
Figura 14.Respuesta en frecuencia del duplexor [15]	23
Figura 15.Respuesta en frecuencia del filtro IF [16].....	24
Figura 16.Máscara de emisión de LTE [17].....	25
Figura 17.Respuesta en frecuencia del filtro RF del sistema TDT[18]	26
Figura 18.Respuesta en frecuencia del filtro IF del sistema TDT [19]	27
Figura 19.Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena TDT	30
Figura 20.Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena LTE.....	31
Figura 21.Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena Yagi	32
Figura 22. Modulaciones LTE [20].....	33
Figura 23. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m	34
Figura 24. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:100 m	34
Figura 25. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:300 m	34
Figura 26. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m	34
Figura 27. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km	35
Figura 28. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km	35
Figura 29. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:2.5 km	35
Figura 30. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:5.5 km	35
Figura 31. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:6km	37
Figura 32. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:12km	37
Figura 33. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24km	37
Figura 34. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36km	37
Figura 35. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48km	38
Figura 36. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60km	38
Figura 37. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66km	38
Figura 38. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	V

Figura 39. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	V
Figura 40. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	V
Figura 41. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	V
Figura 42. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	VI
Figura 43. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	VII
Figura 44. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	VII
Figura 45. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	VII
Figura 46. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	VII
Figura 47. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	VIII
Figura 48. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	IX
Figura 49. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	IX
Figura 50. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	IX
Figura 51. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m.....	IX
Figura 52. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	X
Figura 53. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	X
Figura 54. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	XI
Figura 55. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	XI
Figura 56. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	XI
Figura 57. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m.....	XI
Figura 58. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	XII
Figura 59. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	XII
Figura 60. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	XIII
Figura 61. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	XIII
Figura 62. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	XIII
Figura 63. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m.....	XIII
Figura 64. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	XIV
Figura 65. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	XIV
Figura 66. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m.....	XV
Figura 67. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m.....	XV
Figura 68. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m.....	XV
Figura 69. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m.....	XV
Figura 70. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km.....	XVI
Figura 71. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km.....	XVI
Figura 72. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36km	XVII
Figura 73. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48km	XVII
Figura 74. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX::60 km	XVII
Figura 75. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XVII
Figura 76. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km	XIX
Figura 77. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XIX
Figura 78. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XIX
Figura 79. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:12 km	XXI

Figura 80. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24 km	XXI
Figura 81. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36 km	XXI
Figura 82. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km	XXI
Figura 83. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XXII
Figura 84. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXII
Figura 85. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km	XXIII
Figura 86. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XXIII
Figura 87. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXIII
Figura 88. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XXV
Figura 89. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXV
Figura 90. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:14 km	XXVI
Figura 91. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24 km	XXVI
Figura 92. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36 km	XXVI
Figura 93. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km	XXVI
Figura 94. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XXVII
Figura 95. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXVII
Figura 96. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km	XXVIII
Figura 97. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXVIII
Figura 98. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km	XXIX

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores de SINR para la modulación QPSK.....	19
Tabla 2.Efecto de la máscara de emisión del sistema TDT sobre los canales de LTE.....	22
Tabla 3.Efecto del duplexor sobre los canales TDT	23
Tabla 4.Efecto del filtro IF sobre los canales del sistema TDT	24
Tabla 5.Efecto del leakage del sistema TDT sobre el sistema LTE.....	24
Tabla 6.Efecto de la máscara de emisión de LTE sobre los canales del sistema TDT.....	25
Tabla 7.Efecto del filtro RF de TDT sobre los canales del sistema LTE.....	26
Tabla 8. Efecto del filtro RF de TDT sobre los propios canales de TDT.....	26
Tabla 9.Efecto del filtro IF de TDT sobre los canales del sistema LTE	27
Tabla 10.Efecto del leakage del sistema LTE sobre el sistema TDT.....	28
Tabla 11.Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal A	34
Tabla 12.Parámetros del efecto del canal A sobre canal 60	36
Tabla 13.Párametros aplicados.....	I
Tabla 14.Características antena Yagi	III
Tabla 15.Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal B	V
Tabla 16.Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal C	VII
Tabla 17.Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal A	IX
Tabla 18.Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal B	XI
Tabla 19.Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal C	XIII
Tabla 20.Parámetros del efecto del canal 58 sobre canal A, B y C.....	XV
Tabla 21.Parámetros del efecto del canal A sobre canal 59	XVII
Tabla 22.Parámetros del efecto del canal A sobre canal 58	XIX
Tabla 23.Parámetros del efecto del canal B sobre canal 60	XXI
Tabla 24. Parámetros del efecto del canal B sobre canal 59	XXIII
Tabla 25.Parámetros del efecto del canal B sobre canal 58	XXV
Tabla 26.Parámetros del efecto del canal C sobre canal 60	XXVI
Tabla 27.Parámetros del efecto del canal C sobre canal 59	XXVIII
Tabla 28.Parámetros del efecto del canal C sobre canal 58	XXIX
Tabla 29. <i>Modulación según SINR mínima (LTE)</i>	XXXV
Tabla 30. <i>Modulación según SINR mínima (TDT)</i>	XXXVII

1 Introducción

1.1 Motivación

La televisión analógica siempre ha empleado para su transmisión parte de la banda VHF (47MHz – 230MHz) y parte de la banda UHF (470 MHz – 862 MHz). Con la introducción de nuevas tecnologías digitales, el ancho de banda necesario para su emisión se redujo, dejando libre parte del espectro. A esta banda libre se le denominó Dividendo Digital (DD), que se destinó al uso de la telefonía móvil de última generación.

Como este proyecto se va a desarrollar en la banda de 800 MHz, solo se va a hacer referencia a la banda superior, UHF, que contiene los canales del 20 al 69. Debido al dividendo digital, se asignaron los canales del 61 al 69 al sistema LTE para cumplir con los acuerdos internacionales establecidos.

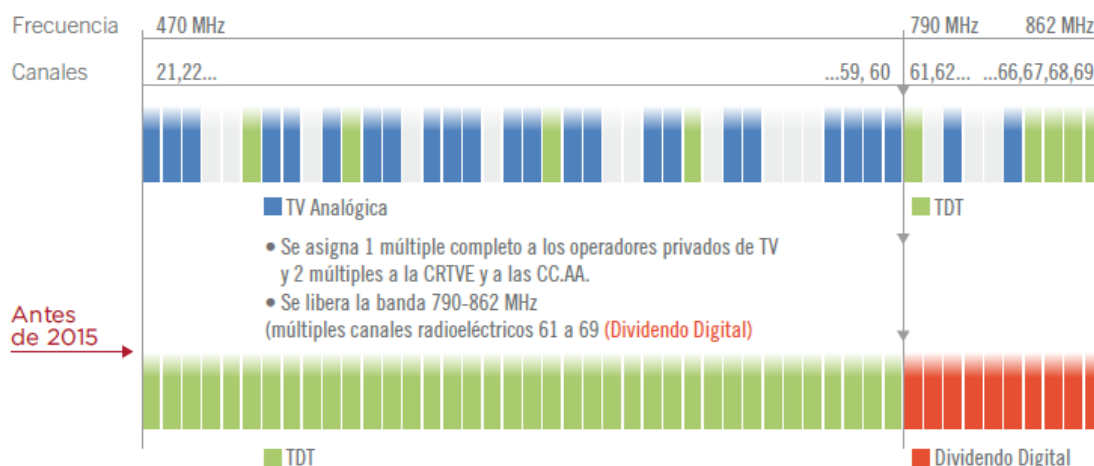


Figura 1. Dividendo Digital (DD)[6]

Se observa en la Figura 2 que el último canal de TDT, es decir, el canal 60, acaba en una frecuencia de 790 MHz y que el primer canal de LTE comienza en 791 MHz, por lo que hay una banda de guarda de 1 MHz. Esta banda es la que controla las distintas interferencias que se pueden producir entre ambos sistemas, por lo que es necesario realizar el estudio para demostrar si pueden o no convivir ambos sistemas en la banda de 800 MHz.



Figura 2. Canales próximos de TDT y LTE en la banda de 800 MHz [7]

1.2 Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal estudiar la coexistencia entre la telefonía móvil de cuarta generación, LTE (*Long Term Evolution*) y la televisión digital, DTV (*Digital Television*), en la banda de 800 MHz. Se va a analizar como interfiere el sistema LTE sobre el sistema DTV y viceversa, en la banda de trabajo indicada. Para ello se implementarán los programas necesarios haciendo uso de la plataforma de desarrollo *Matlab R2010a*.

Para el desarrollo de este proyecto se va hacer uso de los tres últimos canales del sistema DTV, los cuales trabajan con un ancho de banda de 8 MHz: canal 58 (766 MHz – 774 MHz), canal 59 (774 - 782 MHz) y canal 60 (782 MHz – 790 MHz), y de los tres primeros canales del sistema LTE, donde cada uno de éstos ocupa un ancho de banda de 5 MHz: canal A (791 MHz – 796 MHz), canal B (796 MHz – 801 MHz) y canal C (801 MHz – 806 MHz). Sólo se prestará atención a estas frecuencias del sistema LTE porque se va a trabajar en la banda de 800 MHz, banda donde se encuentra el enlace de descarga (descendente) o *downlink*.

1.3 Organización de la memoria

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado consta de la siguiente estructura:

El **Capítulo 1** contiene la introducción, que está constituida por la motivación y los objetivos del Trabajo de Fin de Grado, además de la organización de la memoria.

El **Capítulo 2** realiza un análisis del estado del arte sobre la coexistencia entre el sistema LTE y el sistema DTV. Se comentan las distintas investigaciones que se han llevado a cabo en las distintas regiones de todo el mundo, además del uso de cada sistema en cada una de éstas.

El **Capítulo 3** define las características principales de los sistemas a emplear en este proyecto.

El **Capítulo 4** presenta los escenarios que se van a manejar en el estudio, el modelo de propagación aplicado, el cálculo del radio de cobertura de la estación base LTE, el

análisis del efecto que un sistema produce sobre otro y, por último, la explicación del programa desarrollado para realizar el estudio pertinente.

El **Capítulo 5** describe y muestra los resultados obtenidos una vez ejecutado el programa descrito en el capítulo anterior.

El **Capítulo 6** describe las conclusiones obtenidas al final del proyecto y posibles líneas de trabajo futuro.

Por último, además de enumerar las referencias utilizadas para el desarrollo de esta memoria, se encuentra el Anexo A, que contiene los parámetros necesarios para la ejecución de este programa; en el Anexo B se encuentra información sobre los parámetros de la antena Yagi aplicada en el Escenario 2; los Anexos C y D contienen los resultados del Escenario 1 y Escenario 2, respectivamente; en el Anexo E se localizan las características de la antena de la estación base LTE mientras que el Anexo F incluye las características de la antena de transmisión TDT; y finalmente, los Anexos G y H presentan los valores de *SINR min* empleados según las distintas modulaciones para LTE y para DTV.

2 Estado del arte

El estudio de la coexistencia entre los servicios TDT y la tecnología celular 4G en la banda de 800 MHz se ha analizado en varios países. Estas investigaciones se han realizado ya que se han observado ciertas interferencias producidas en los canales más próximos entre ambas tecnologías en la banda del Dividendo Digital.

La Conferencia Regional de Radiocomunicaciones (*Regional Radiocommunication Conference, RRC*) de la Región 1 de la ITU (*International Telecommunications Union*) de 2006, que corresponde a Europa y África, acordó utilizar la banda UHF (470 MHz - 862 MHz, que corresponde a los canales radioelétricos del 21 al 69) para servicios de radiodifusión. Al año siguiente, en 2007, en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (*World Radiocommunication Conference, WRC*), la ITU decidió asignar a LTE la banda superior de la banda UHF: 790MHz – 862 MHz. Así, el espectro quedó dividido en tres regiones a lo largo del mundo, como se observa en la Figura 3: Región 1 corresponde a Europa y África, Región 2 a América y Región 3 a Oceanía y Asia.

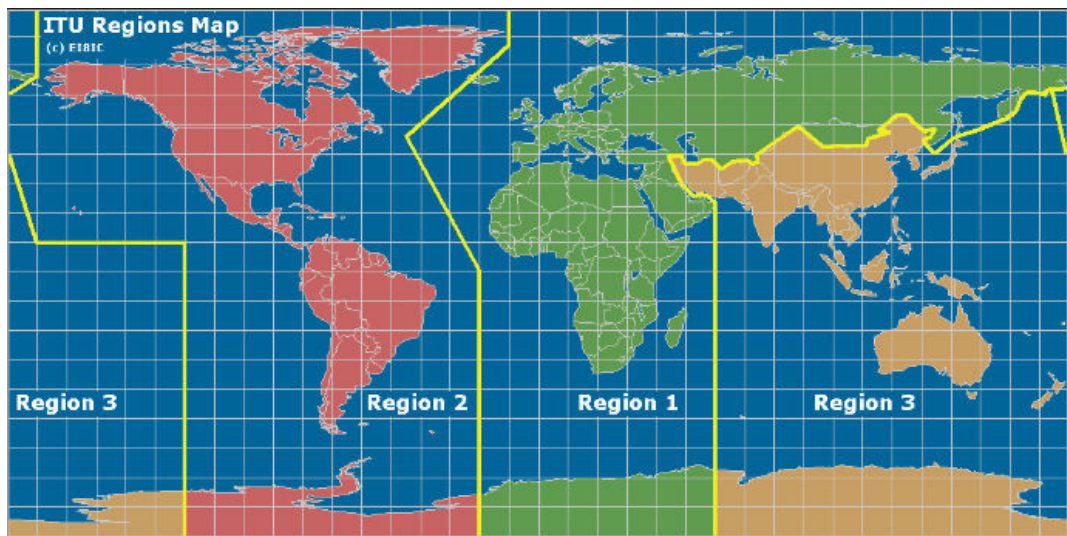


Figura 3. Mapa de Regiones determinada por la ITU [8]

Para el desarrollo de este trabajo de fin de grado se han encontrado ciertas referencias basadas en la banda de 800 MHz, banda que pertenece a Europa, y que contienen información necesaria: en [1] se comentan los requisitos más comunes para la coexistencia entre LTE (*Long Term Evolution*) y DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), tanto en interiores como en exteriores, para diferentes escenarios; en [2] se expone que si no se establece una banda de guarda de ancho suficiente, el rendimiento de DVB-T puede verse muy afectado por los canales adyacentes del sistema LTE; y en

[3] se justifica que debido a la proximidad de una estación base LTE a un receptor TDT es indispensable tener en cuenta un filtro externo entre el receptor TDT y la antena de televisión.

Los efectos que se producen entre ambos sistemas han sido objetivo de numerosos estudios por parte de distintas organizaciones a nivel mundial, como son por ejemplo *DIGITALEUROPE*, que dividió en [4] los tipos de interferencias y sus posibles soluciones o *CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations)*, que definió en [1] la máscara de bloque de un canal LTE para que no hubiese interferencia con TDT o *ITU*.

Concretamente, se realizaron algunos estudios en varios países de Europa como Francia, en los cuales se aconsejó la introducción de un filtro selectivo entre la antena y el amplificador para la reducción de interferencias; o Reino Unido, donde se analizó el rendimiento de DVB-T con recepción fija sobre tejado con modulación 64-QAM, en el cual se evaluaron filtros paso bajo domésticos diseñados por las empresas *Technetix* y *Braun* [5].

Respecto a LTE, cada región decidió qué banda utilizaría esta tecnología. Mientras que las Regiones 1 y 3 optaron por la banda de 800 MHz, la Región 2 escogió la banda de 700 MHz.

En cuanto a la televisión digital, los estándares utilizados en las distintas regiones son los siguientes. En la Región 1, DVB-T (*Digital Video Broadcasting- Terrestrial*), junto con su evolución DVB-T2. En la Región 2, cada país usó uno distinto: por ejemplo, Estados Unidos optó por ATSC (*Advanced Television Systems Committee*) mientras que Colombia prefirió el usado por Europa (DVB-T/DVB-T2). En la Figura 4 se observan los distintos estándares de cada región:

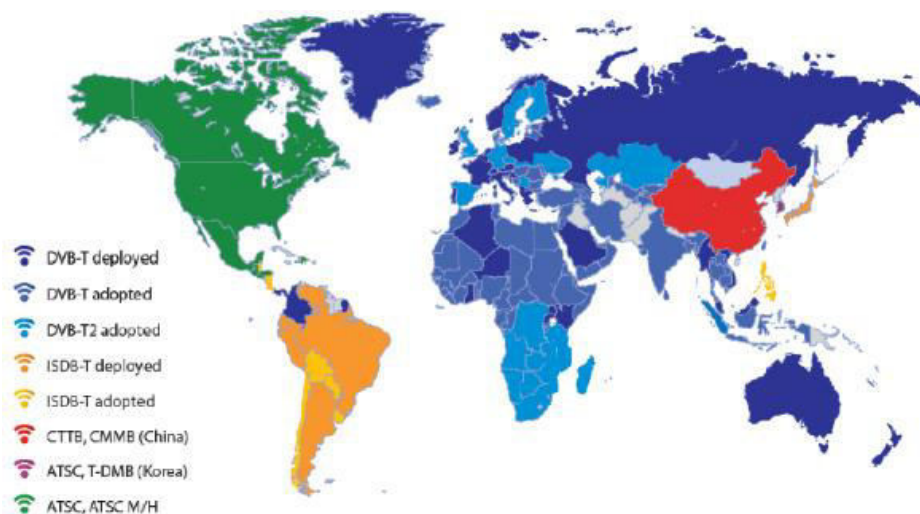


Figura 4. Estándares de Televisión Digital Terrestre [9]

En este Trabajo de Fin de Grado se va a estudiar la convivencia entre los sistemas LTE y TDT para una banda de 800 MHz en distintos escenarios, que son:

1. Tecnología LTE que recibe señal transmisora interferente del sistema TDT.
2. Sistema TDT que recibe señal transmisora interferente de la tecnología LTE.

En ambos casos se van a realizar simulaciones con diferentes distancias para las modulaciones QPSK, 16QAM y 64 QAM. En este documento solo se muestran los resultados para la modulación QPSK ya que es el que tiene un nivel de SINR menor, es decir, el nivel mínimo de señal que se recibe necesario para tener cobertura.

Como se ha observado, debido a la falta de trabajos en el que se han desarrollado ambos casos de forma conjunta, este estudio va a ser amplio, completo y exhaustivo.

3 Sistemas LTE y TDT

En este capítulo se analizan más detenidamente los sistemas empleados en este estudio, ya que es primordial tener claros los conceptos básicos sobre las tecnologías a emplear, sus características, las modulaciones respectivas para, a continuación, poder llevar a cabo las simulaciones correspondientes y explicar los resultados obtenidos.

3.1 LTE

También conocido como *Long Term Evolution (Evolución a largo plazo)*, es la telefonía móvil de cuarta generación, 4G -evolución de la norma 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*)-. Su principal diferencia frente a las tecnologías anteriores (1G, 2G, 3G) es la rapidez en el acceso a los servicios a través de las redes, además de la mejora de la eficiencia espectral debido a la utilización de las técnicas de acceso múltiple OFDMA (*dowlink*) y, de SC-FDMA (*uplink*), que se desarrollan en el apartado 3.1.2.

LTE permite altas tasas de bits con baja latencia (de alrededor de 10 ms), es barato y fácil de desplegar por los operadores, está basada en una arquitectura de conmutación de paquetes IP, y evita la fragmentación por el tipo de duplexación. Esto es así ya que hay plena integración de los modos de acceso tanto de FDD (*Frequency Division Duplex*), que utiliza varias zonas del espectro, como de TDD (*Time Division Duplex*), que ocupa una sola zona. Así, se consigue que un terminal extranjero, por ejemplo un teléfono procedente de China, que sea LTE TDD funcione en España sin ningún inconveniente.

Esta tecnología se desarrolló a causa de la gran necesidad que había en asegurar la competitividad del sistema 3G para el futuro y así satisfacer a los usuarios que demandaban más calidad, más disponibilidad, más seguridad y mayor rapidez de servicio. Para aumentar la capacidad del sistema se introdujo la antena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*): los dispositivos tienen múltiples conexiones para una celda, lo cual incrementa la estabilidad de la conexión, reduce la latencia e incrementa el rendimiento de la conexión.

LTE transmite datos de banda ancha inalámbrica que está diseñada para poder dar soporte al constante acceso de teléfonos móviles y de dispositivos portátiles a internet. Además, se usa para la bajada de datos (enlace descendente), que tiene una velocidad máxima de 50 Mbps, y subida de datos (enlace ascendente), que tiene una velocidad máxima de 100 Mbps, desde internet. Permite tasas de transferencia de datos entre el usuario y la red de hasta 300 Mbps en descarga, lo que posibilita un alto número de aplicaciones con mayor carga de datos.

Hay que tener en cuenta que LTE y 4G no son lo mismo, aunque ambas estén relacionadas, ya que LTE es un estándar que no llega a la velocidad marcada oficialmente por el estándar 4G. Mientras que 4G puede alcanzar velocidades de hasta 144 Mbps, LTE adquiere velocidades de hasta 100 Mbps. Por esta razón, se suele decir que LTE es 3.9G.

Debido a la necesidad de considerar una red 4G surge LTE-Advanced que puede alcanzar velocidades de más de 1Gbps. A esta tecnología sí que se le puede considerar 4G, ya que cumple con los requisitos que la *ITU* ha establecido.

LTE-advanced es compatible con dispositivos 4G pero no con los 3G. Esta tecnología promete grandes ventajas para los usuarios como la velocidad de descarga y carga de datos. Es más segura y más óptima ya que combina una serie de tecnologías que ofrecen un mejor servicio de rendimiento a los usuarios y será la clave para el despliegue masivo del internet móvil.

La red LTE está ampliamente disponible en la mayoría de las zonas urbanas de Europa y América del Norte. Hay muchas grandes ciudades de otros continentes que aún no disponen de conectividad LTE, como África o Asia, ya que se necesita una infraestructura para comunicación sin cable, materiales que estos países no pueden conseguir. En cambio, esta tecnología en España se usa incluso para la transmisión de televisión.

3.1.1 Técnicas de Acceso Múltiple: OFDMA y SC-FDMA

A medida que fueron evolucionando las telecomunicaciones se tuvo cada vez más en cuenta la eficiencia y el desaprovechamiento de ancho de banda en la transmisión de información. Por esta razón se implementó el método de multiplexado, procedimiento que consiste en intercalar diferentes tipos de información sin mezclarse.

Debido a la necesidad de los sistemas de comunicación inalámbricos de conseguir un servicio de alta velocidad de transmisión y calidad, se creó la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, también conocida como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Es un esquema de modulación digital en el cual se divide el espectro disponible en varios subcanales donde las subportadoras, escogidas de manera precisa de forma tal que sus espectros no interfieran a las frecuencias centrales de cada subportadora, son ortogonales y cercanas entre sí, haciendo que su ancho de banda se sobreponga.

Esta superposición no crea ningún tipo de interferencia ya que al usar una señal sinusoidal, el área de un periodo es 0 -se anulan la parte positiva y la parte negativa-. Por esta razón se permite la transmisión simultánea de información en un rango estrecho de

frecuencias sin que se produzca ninguna interferencia entre las portadoras. A esto se le llama interferencia intersimbólica o *ISI*.

La tecnología OFDM ha sido utilizada para muchos sistemas, como DVB-T o WiMAX móvil, que es el otro estándar de 4G que existe hoy en día.

Una variante del OFDM es el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal, también conocido como OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*). Se cataloga como una técnica de modulación y de acceso múltiple que consigue que varios usuarios de un sistema de telecomunicaciones compartan el espectro de un cierto canal para aplicaciones de baja velocidad, obteniéndose un sistema mejorado y robusto.

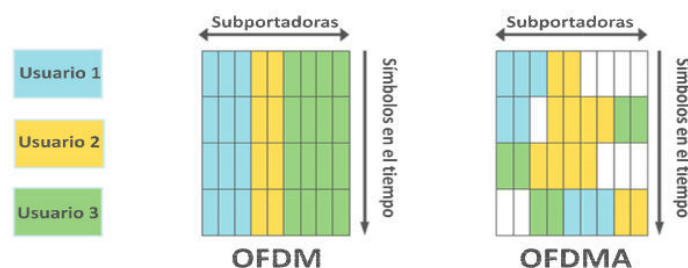


Figura 5. Asignación de subportadoras OFDM Y OFDMA [10]

Se observa en la Figura 5 que aunque OFDM es más sencillo, es menos eficiente ya que si un usuario necesita menos de la capacidad total, se le asignan igualmente todos los símbolos modulados. Por el contrario, los usuarios del sistema OFDMA tienen asignados un número específico de subportadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada. Esto es lo que se conoce en las especificaciones de LTE como *Resource Blocks* (RB).

Por otro lado, se encuentra el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única, también conocida como SC-FDMA. Esta técnica se emplea porque el alto PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) de OFDMA hace que no se pueda utilizar en equipos móviles a causa de su gran consumo energético. Debido a que OFDMA es multiportadora (se transmite en paralelo) y SC-FDMA es portadora única (se transmite en serie), esta última tiene un PAPR más bajo, lo que permite que sea adecuada para el canal ascendente.

3.1.2 Esquemas de Modulación

Según *American National Standard for Telecommunications*, la modulación es el proceso por el cual se varía una característica de una onda portadora de acuerdo con una señal que transporta información. Con esto se aprovecha mejor el canal de comunicación, lo que hace posible transmitir más información de forma simultánea y mejora la resistencia contra posibles ruidos e interferencias.

Existen dos tipos de modulaciones: analógicas, que son las que se realizan a partir de señales analógicas de información, como por ejemplo la voz humana, y digitales, que son aquellas que se llevan a cabo a partir de señales generadas por fuentes digitales. En concreto, LTE emplea las modulaciones digitales QPSK y QAM.

Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria o QPSK

Es una modulación angular que varía la fase de la onda portadora, una onda de amplitud y fase fija, mediante una señal digital.

Esta modulación digital se representa en el diagrama de constelación por cuatro puntos equidistantes del origen de coordenadas. Codifica dos bits por cada símbolo (ver Figura 6) y ésta asignación se hace mediante el código Gray. Este código consiste en que, entre dos símbolos adyacentes, los símbolos solo se diferencian en 1 bit, con lo que se logra minimizar la tasa de bits erróneos.

Esta modulación al transmitir dos bits de información en lugar de uno duplica la capacidad de transmisión de la onda portadora en un ancho de banda determinado.

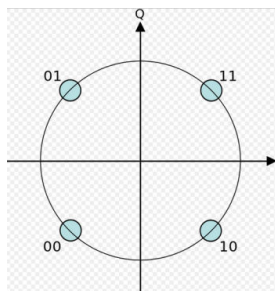


Figura 6. Diagrama de constelación de QPSK [11]

Es una de las técnicas de modulación digital más populares debido a su resistencia, fácil implementación y menor susceptibilidad al ruido que otras técnicas de modulación.

Modulación de amplitud en cuadratura o QAM

Es una modulación digital que transporta dos señales independientes, mediante la modulación de una señal portadora, tanto en amplitud como en fase. Esto se consigue modulando una misma onda portadora, desfasada 90°.

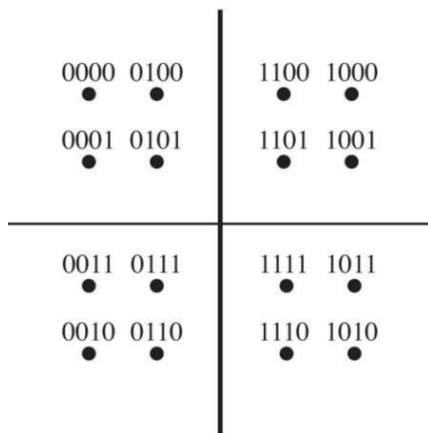


Figura 7. Diagrama de 16 QAM [11]

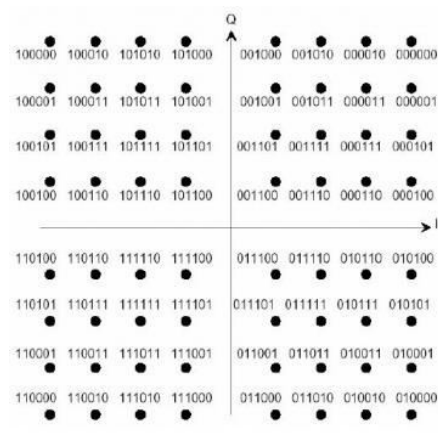


Figura 8. Diagrama de 64 QAM [11]

En el estudio se emplea la modulación 16 QAM (ver Figura 7), la cual tiene 4 bits por símbolo, y la modulación 64 QAM (ver Figura 8), 6 bits por símbolo.

Al cambiar de una constelación de orden inferior a una de orden superior es posible transmitir más bits eficaces por símbolo, pero si la energía media de la constelación se mantiene, los puntos estarán más cerca siendo más susceptibles al ruido, a interferencias y a la distorsión, haciendo que la tasa de bits de error sea más alta. Esto se traduce en que las modulaciones QAM de orden superior tienen la posibilidad de ofrecer más datos pero menos fiables.

El uso de sistemas de modulación de orden superior, como 16-QAM y 64-QAM, son necesarios en los nuevos sistemas 3GPP LTE R8, así como en las futuras normas de los sistemas de comunicaciones inalámbricas, para aumentar la velocidad de transmisión de los datos.

3.2 Televisión Digital

También conocida como *DTV (Digital Television)*, es la tecnología que permite que las estaciones de televisión proporcionen las imágenes más claras y con mejor calidad del sonido.

En el estudio que se va a realizar se emplea un tipo de esta tecnología: Televisión Digital Terrestre, también conocido como TDT, que es la que sustituye a la televisión analógica terrestre.

3.2.1 Sistema TDT

La Televisión Digital Terrestre o TDT, es la que transmite imágenes en movimiento y su sonido asociado, mediante codificación binaria a través de una red de repetidores

terrestres sin coste adicional. Este sistema surge de la necesidad de lograr una transmisión y una recepción de la señal con mayor calidad.

Para su transmisión emplea ondas electromagnéticas, lo que permite que la recepción de la señal se efectúe a través de las antenas individuales y colectivas que están instaladas hoy en día. La elección de estas antenas debe ser muy selectiva.

Esta tecnología permite utilizar redes de frecuencia única (SFN), proporciona la misma cobertura que la televisión analógica y la calidad de la señal que se recibe depende de la climatología: es poco estable cuando hay calor, viento, polvo. El canal de transmisión no es bidireccional, por lo que es necesario utilizar una línea telefónica o un cable.

Gracias a las técnicas de difusión de contenidos utilizadas en la TDT se puede producir la presencia simultánea de muchos usuarios interactuando con la misma aplicación mediante el estándar *mhp* (*Multimedia Home Platform*), estándar que define una plataforma común para las aplicaciones interactivas de la televisión digital.

Debido a la digitalización de la televisión se aprovecha mejor el ancho de banda, lo que permite que en un canal UHF se puedan transmitir varios programas, además de aumentar el número de canales de televisión debido a la reducción del ancho de banda necesario para la transmisión de cada canal. Como consecuencia de un uso mejor de este ancho de banda las emisiones de TDT posibilitan numerosos servicios como servicios interactivos, que permiten participar en encuestas, concursos, y acceso a Internet, además de contener mayor calidad audiovisual, en formato panorámico y en alta definición, y sin ruidos ni interferencias ni doble imagen.

3.2.2 Técnica de Modulación COFDM

Cuando se emplea OFDM junto con codificación de canal para detección y corrección de errores, se obtiene la modulación COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), también conocida como modulación por división ortogonal de frecuencia codificada. Esta modulación ofrece una señal robusta y proporciona protección contra los ecos producidos por los múltiples caminos que toma la señal en su propagación, permitiendo reutilizar las mismas frecuencias en antenas vecinas, ya que contiene portadoras que llevan una tasa de símbolos muy baja.

El estándar utilizado para la transmisión de TDT en España es el DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), la cual utiliza la modulación COFDM.

Es una modulación digital compleja de banda ancha que utiliza múltiples portadoras ortogonales, cada una modulada en amplitud y fase, lo que consigue protección contra interferencias co-canal: si se pierde información de una portadora debido a estas

interferencias se pierde una pequeña porción de información que no tiene por qué ser relevante para la calidad de la transmisión.

Este tipo de modulación se suele dar en las grandes ciudades, donde se recibe una señal directa del transmisor y una cierta cantidad de señales retardadas por las reflexiones con los edificios. (ver Figura 9)

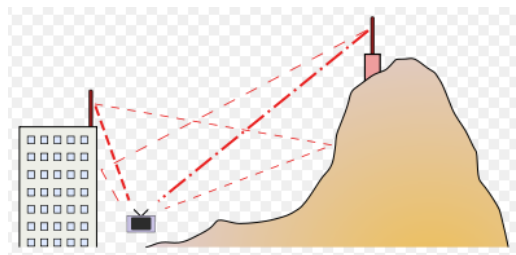


Figura 9. Ecos producidos por múltiples caminos de la señal en su propagación [12]

Esta técnica contiene unas señales cuadradas que se ajustan al ancho de banda asignado a cada canal, lo que implica que las emisiones digitales no saturan los canales de emisión adyacentes, como sí ocurría en las emisiones analógicas. Esto da la posibilidad de utilizar canales adyacentes sin temor a que se produzcan incompatibilidades.

La señal modulada tiene un intervalo de guarda, período en el cual la señal se mantiene constante repitiendo un símbolo. Para que no se produzcan interferencias este intervalo tiene que ser superior al máximo retardo que se produzca por multitrayecto pero inferior al tiempo que dura un símbolo.

Es un tipo de modulación mejorada de OFDM ya que puede soportar multitrayecto severo, cancelación de la señal, ruido de impulsos y presencia de interferencias de banda estrecha co-canal. Además dispone de mecanismos para la detección y corrección de errores que mejoran la tasa de error en las señales recibidas en entornos especialmente desfavorables.

4 Coexistencia entre LTE y TDT

Una vez definidos y analizados los sistemas necesarios para llevar a cabo el estudio de la convivencia de ambos y sus características, se va a continuar en este capítulo con la descripción de los escenarios escogidos, los parámetros empleados, la explicación del modelo de propagación, el estudio del *leakage* cuando LTE interfiere a TDT y viceversa, y el cálculo del radio de cobertura de la estación de base de LTE necesario para llevar a cabo el estudio.

4.1 Modelo de propagación

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado.

El modelo de propagación empleado en el estudio es el llamado *Okumura-Hata*, también denominado modelo de Hata. Este modelo proporciona el valor medio de la pérdida básica de propagación en función de la frecuencia, la distancia y las alturas de las antenas de la estación base y el móvil. Está basado en las mediciones obtenidas por Okumura en la ciudad de Japón y es utilizado para predecir el comportamiento de los sistemas móviles en zonas urbanizadas.

Los límites impuestos en este modelo son: la frecuencia de operación del sistema (f) debe oscilar entre 150MHz y 1500 MHz, la altura de la estación base (h_{BS}) entre 30m y 200m, la altura del receptor entre 1m y 10m ($h_{usuario}$) y la distancia entre el transmisor y el receptor entre 1km y 20km (d).

La ecuación de las pérdidas de propagación del modelo es:

$$L_p[dB] = 69.55 + (26.16 \times \log_{10}(h_{BS})) - (13.82 \times \log_{10}(h_{BS})) - a(h_{usuario}) + (44.9 - (6.55 \times \log_{10}(h_{BS})) \times \log_{10}(d))$$

donde $a(h_{usuario})$ es un factor de corrección que depende de la altura del usuario.

Este factor se puede calcular para diferentes entornos de propagación: áreas urbanas (para ciudades pequeñas o medianas y para ciudades grandes), áreas suburbanas y áreas rurales.

Este estudio se realiza en áreas urbanas para ciudades grandes. Por tanto, las ecuaciones del factor de corrección son:

$$a(h_{\text{usuario}}) = 8.29 \times (\log_{10}(1.54 \times h_{\text{usuario}})^2) - 1.1, \text{ para } f \leq 200\text{MHz}$$

$$a(h_{\text{usuario}}) = 3.2 \times (\log_{10}(11.75 \times h_{\text{usuario}})^2) - 4.97, \text{ para } f \geq 400\text{MHz}$$

Como se trabaja en este estudio a una frecuencia de 800 MHz, se emplea la segunda de las ecuaciones para calcular las pérdidas de propagación.

Este factor de corrección solo se emplea en el caso en el que LTE interfiere a DTV, ya que en el caso contrario, según la teoría, como la altura del usuario es 1.5m, $a(h_{\text{usuario}}) = 0$.

4.2 Escenarios planteados

En este apartado se va a realizar un análisis de los escenarios propuestos en este proyecto. Se debe tener en cuenta en ambas escenas que el receptor es externo y fijo y que al trabajar con un ancho de banda de 800 MHz, se emplea el enlace descendente o *downlink*.

En el primer escenario se estudia el caso en el que la señal de transmisión de una estación transmisora TDT interfiere sobre la señal LTE que recibe un usuario, el cuál dispone de un dispositivo móvil (ver Figura 10).

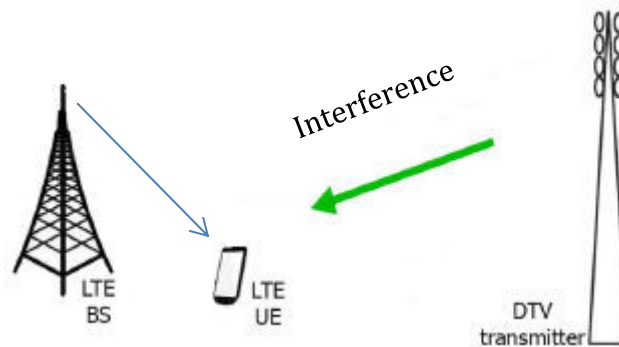


Figura 10. Escenario 1: señal TDT interfiere sobre señal LTE

En el segundo escenario se estudia el caso en el que la señal de transmisión de una estación base LTE interfiere sobre la señal TDT receptora (ver Figura 11).

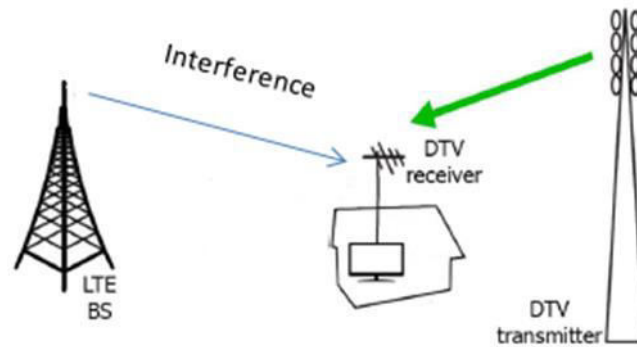


Figura 11. Escenario 2: señal TDT interfiere sobre señal LTE

El estudio se elabora a partir del radio de cobertura calculado a partir de la modulación QPSK de la estación base de LTE, ya que ésta es la que marca el límite mínimo de señal necesario para disponer de una red LTE o red TDT. La estación LTE se encuentra en el centro y la estación base TDT se encuentra al norte respecto a ésta, por lo que está a 90°. A parte, la distancia entre ambas estaciones va variando para que se realice un trabajo íntegro.

4.3 Radio de cobertura

Como se ha comentado en el apartado 4.2, para realizar el estudio de la coexistencia entre los sistemas LTE y TDT, es necesario el radio de cobertura de la estación base del sistema LTE. En este radio es donde se dispone del servicio.

Uno de los parámetros a emplear para el cálculo del radio es la SINR mínima (*Signal to interference plus noise ratio*) de la modulación QPSK, que se define como la relación entre la potencia de una señal de interés y la suma de la potencia de las señales de interferencia y algo de ruido de fondo. Es una forma de medir la calidad de las conexiones inalámbricas. Los valores empleados de SINR para la modulación QPSK, explicada en el apartado 3.1.3, se muestran en la Tabla 1:

	QPSK
Escenario 1	3.5 dB
Escenario 2	7.7 dB

Tabla 1. Valores de SINR para la modulación QPSK

En el escenario 1 se ha elegido el valor más alto de la modulación QPSK de la tabla del Anexo G, ya que para que se produzca la señal mínima necesaria para que haya cobertura en la zona de la estación base LTE se necesita que el valor del SINR de esta modulación sea máximo.

En el escenario 2 se ha elegido el valor más alto de la modulación QPSK de la tabla del Anexo H, ya que para que se produzca la señal mínima que permite que haya cobertura en la zona de la estación transmisora TDT dentro de la macrocelda de LTE se necesita que el valor de esta modulación sea máximo.

Para continuar con el cálculo es también imprescindible el uso de las pérdidas de propagación del sistema LTE (L_{hata}), que se calculan como en el apartado 4.1, el efecto por Multitrayecto ($L_{multitrayecto}$), que es un fenómeno que consiste en la propagación de una onda por varios caminos diferentes, y el efecto por Shadowing ($L_{shadowing}$), que es provocado por un obstáculo que se interpone entre el transmisor y el receptor produciendo así la disminución de la potencia de transmisión:

$$P_n = -114 + 10 * \log_{10}(Bw * 0.92) + NF$$

$$S_{min} = P_n + SINR_{min}$$

$$L_{comp} = (P_{txLTE} + G_{maxtx_LTE} + G_{rxLTE}) - S_{min}$$

$$L_{hata} = L_{comp} - L_{multitrayecto} - L_{shadowing}$$

donde:

- ❖ P_n es la potencia de ruido. Se mide en dBm.
- ❖ S_{min} es la señal mínima. Se mide en dBm.
- ❖ L_{comp} son las pérdidas compensadas de LTE. Se mide en dB.
- ❖ L_{hata} son las pérdidas de propagación del modelo Hata. Se mide en dB.

Finalmente, aplicando las constantes anteriores se llega al cálculo del radio de cobertura (los valores de las constantes se encuentran en el Anexo A):

$$d = 10^{\frac{L_{hata} - 69.55 - 26.16 \times \log_{10}(f) + 13.82 \times \log_{10}(h_{BSLTE}) + a}{44.9 - 6.55 \times \log_{10}(h_{BSLTE})}}$$

donde:

- ❖ d es el radio de cobertura. Se mide en km.
- ❖ B_w es el ancho de banda del sistema LTE. Se multiplica por 0.92 ya que hay que tener en cuenta que del ancho de banda nominal para la transmisión LTE un 8% se emplea para la señalización. Se mide en MHz.
- ❖ NF es el factor de ruido del receptor. Se mide en dB.

- ❖ h_{BSLTE} es la altura de la estación base del sistema LTE. Se mide en metros (m).
- ❖ P_{txLTE} es la potencia de transmisión del sistema LTE. Se mide en dBm.
- ❖ G_{maxtx_LTE} es la ganancia máxima de transmisión del sistema LTE. Se mide en dB.
- ❖ G_{rxLTE} es la ganancia de recepción del sistema LTE. Se mide en dB.

Por tanto, el radio de cobertura obtenido es de 1 Km en ambos escenarios para la modulación empleada.

4.4 Efecto del Leakage

Si parte de la señal de un sistema se filtra en el espectro de la señal del otro sistema, causando así interferencias, se produce el llamado efecto del *leakage*. En la Figura 12 se muestra el caso en el que la señal LTE interfiere sobre la señal TDT:

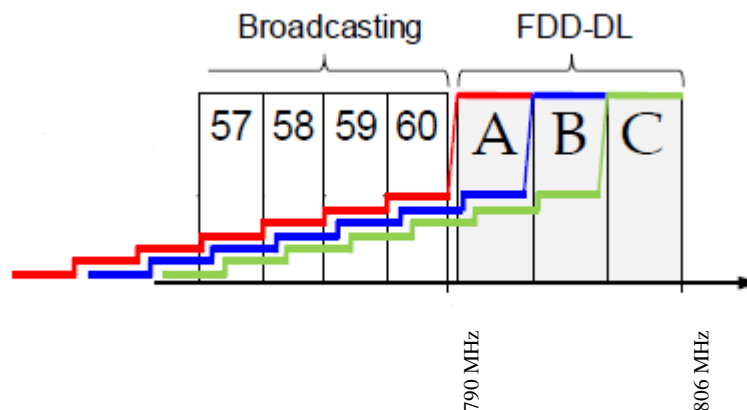


Figura 12. Representación del efecto del leakage del sistema LTE sobre el sistema TDT [13]

En este trabajo de fin de grado se va a estudiar únicamente el efecto comentado sobre los canales A, B y C del sistema LTE y sobre los canales 58, 59 y 60 del sistema TDT, ya que es donde más se observa el impacto del *leakage* entre ambos sistemas.

Todos los elementos a analizar no son ideales, por lo que hay que tener en cuenta el efecto que estos tienen sobre los canales a estudiar.

Para proteger los servicios de radiocomunicaciones se definen máscaras del espectro en la proximidad de las emisiones principales.

Para el escenario 1, en el que el sistema TDT interfiere sobre el sistema LTE, se emplea la máscara de emisión representada en la Figura 13, con un canal de ancho de banda de 8 MHz:

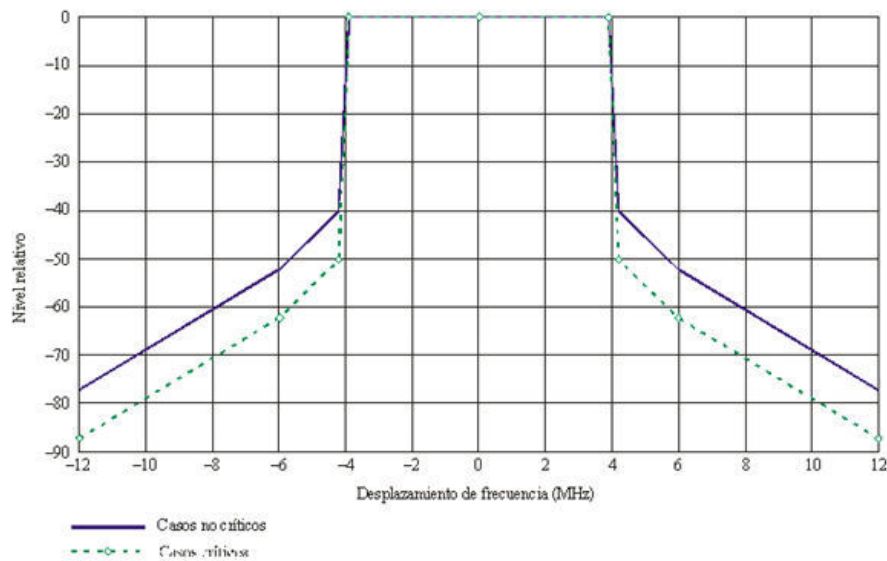


Figura 13. Máscara de transmisión TDT con un ancho de banda de 8 MHz [14]

En la Tabla 2 se muestran los valores de la máscara de TDT que se filtran a los canales más próximos de LTE (canales A, B y C):

	Canal A	Canal B	Canal C
Canal 60	-52 dB	-74 dB	-78 dB
Canal 59	-78 dB	-78 dB	-78 dB
Canal 58	-78 dB	-78 dB	-78 dB

Tabla 2. Efecto de la máscara de emisión del sistema TDT sobre los canales de LTE

Respecto al equipo móvil LTE, lo primero que hace es dividir la señal LTE en *downlink* y *uplink*. El dispositivo que realiza esta función es el duplexor. El escogido para este estudio en la banda de 800 MHz es el 856979 de *TriQuint Semiconductor*, cuya respuesta en frecuencia se representa en la Figura 14.

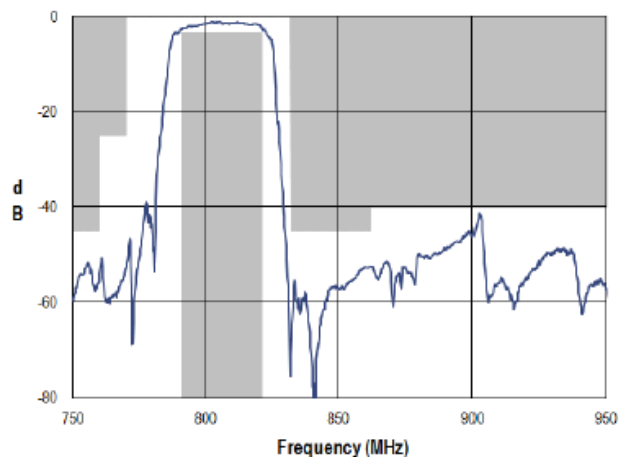


Figura 14. Respuesta en frecuencia del duplexor [15]

Con esta gráfica se deduce la cantidad de señal del duplexor que se filtra de la señal LTE a cada uno de los canales del sistema TDT, valores que se muestran en la *Tabla 3*. Este dispositivo atenúa la señal de los otros sistemas que pueden afectar al sistema LTE, por lo que provoca mejores resultados en las interferencias que reciben los canales LTE. Se debe comentar que el efecto que tiene éste sobre la señal deseada (LTE) es de 2.5 dB, pero ya se tiene en cuenta en el factor de ruido (NF).

	Canal 60	Canal 59	Canal 58
Canales A,B,C	-13 dB	-41 dB	-48 dB

Tabla 3. Efecto del duplexor sobre los canales TDT

El receptor LTE contiene además del duplexor un filtro IF, el cual deja pasar las frecuencias intermedias. El filtro escogido para este estudio es el 854660 de SAWTEK, TriQuint, cuya frecuencia intermedia es de 70 MHz y respuesta en frecuencia es la representada en la Figura 15:

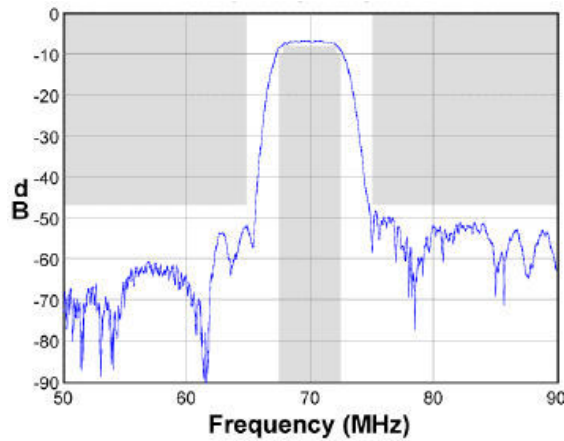


Figura 15. Respuesta en frecuencia del filtro IF [16]

Se debe comentar que este filtro tiene unas pérdidas de inserción de 8 dB que afectan a la señal deseada. En la *Tabla 4* se muestran los valores de la señal del filtro IF que afectan a los canales más próximos de TDT (canales 60, 59 y 58):

	Canal 60	Canal 59	Canal 58
Canal A	-18 dB	-58 dB	-63 dB
Canal B	-57 dB	-62 dB	-65 dB
Canal C	-60 dB	-64 dB	-67 dB

Tabla 4. Efecto del filtro IF sobre los canales del sistema TDT

Una vez calculado el efecto que la máscara TDT ejerce sobre el sistema LTE y el duplexor y filtro IF sobre el sistema TDT para la banda de 800 MHz, se calcula el efecto del *leakage*, que se tendrá en cuenta en el cálculo de la señal interferente, de la siguiente forma para los distintos canales (*Tabla 5*). Se debe comentar que los valores del duplexor LTE, del filtro IF LTE y del transmisor TDT se suman a la vez y no uno por uno ya que se encuentran en serie.

$$Leakage = 10 \times \log_{10} \left(10^{\frac{efectoduplexor_{LTE}[dB] + efectoIF_{LTE}[dB]}{10}} + 10^{tx_{TDT}[dB]/10} \right)$$

	Canal A	Canal B	Canal C
Canal 60	-33dB	-70dB	-73.5dB
Canal 59	-78dB	-78dB	-78dB
Canal 58	-78dB	-78dB	-78dB

Tabla 5. Efecto del leakage del sistema TDT sobre el sistema LTE

Para el escenario 2, en el que el sistema LTE interfiere sobre el sistema TDT, se emplea la máscara de emisión representada en la Figura 16:

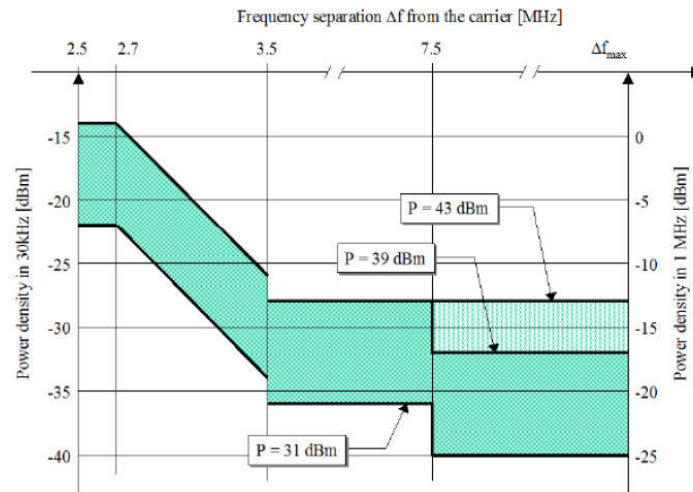


Figura 16. Máscara de emisión de LTE [17]

En la *Tabla 6* se muestran los valores de la máscara de LTE que se filtran en la señal de TDT. Se calcula este efecto aproximando el rango de valores que se encuentra en verde en la Figura 16:

	Canal 60	Canal 59	Canal 58
Canal A	-47 dB	-49 dB	-49 dB
Canal B	-49 dB	-49 dB	-49 dB
Canal C	-49 dB	-49 dB	-49 dB

Tabla 6. Efecto de la máscara de emisión de LTE sobre los canales del sistema TDT

Por otro lado, el receptor TDT está formado por un filtro RF y un filtro IF. El filtro RF atenúa las interferencias que produce el sistema LTE sobre la señal TDT, mejorando así las interferencias que reciben los canales TDT, y el filtro IF admite frecuencias intermedias.

El filtro RF escogido para este estudio es *SLTE 90 Premium de Spaun*, cuya respuesta en frecuencia se representa en la Figura 17.

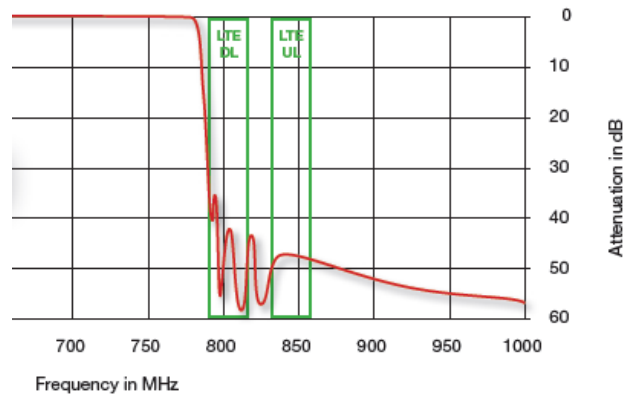


Figura 17. Respuesta en frecuencia del filtro RF del sistema TDT[18]

En las tablas 7 y 8 se expone la cantidad de señal del filtro RF que afecta al sistema LTE y a los canales más próximos del sistema TDT, respectivamente:

	Canal A	Canal B	Canal C
Filtro RF	-41 dB	-47 dB	-44 dB

Tabla 7. Efecto del filtro RF de TDT sobre los canales del sistema LTE

	Canal 60	Canal 59	Canal 58
Filtro RF	-16 dB	-1 dB	0 dB

Tabla 8. Efecto del filtro RF de TDT sobre los propios canales de TDT

El filtro IF elegido para el sistema TDT es *X7253D* con una frecuencia intermedia de 36 MHz y cuya respuesta en frecuencia se presenta en la Figura 18. Se debe comentar que el efecto que tiene éste sobre la señal deseada (TDT) es de 3 dB, valor que ya se tiene en cuenta en el factor de ruido (NF).

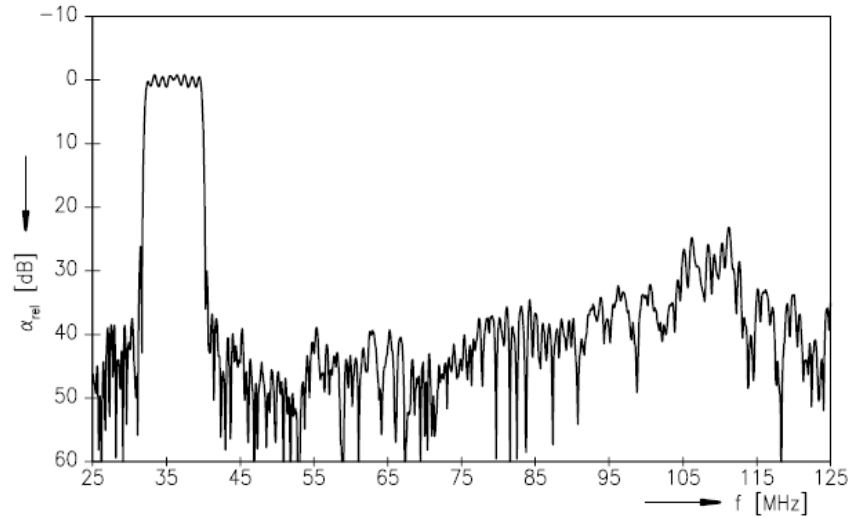


Figura 18. Respuesta en frecuencia del filtro IF del sistema TDT [19]

En la *Tabla 9* se muestran los valores de la señal del filtro IF que afectan a los canales más próximos de LTE:

	Canal A	Canal B	Canal C
Canal 60	-47 dB	-51 dB	-54 dB
Canal 59	-53 dB	-56 dB	-58 dB
Canal 58	-57 dB	-58 dB	-59 dB

Tabla 9. Efecto del filtro IF de TDT sobre los canales del sistema LTE

Una vez calculado el efecto que producen la máscara de LTE y los filtros RF e IF sobre el sistema TDT y el sistema LTE, respectivamente para la banda de 800 MHz, se calcula el efecto del *leakage* que se tendrá en cuenta en el momento de calcular la señal interferente de la siguiente manera para los distintos canales (*Tabla 9*). Se debe comentar que los valores del filtro RF TDT, del filtro IF TDT y del transmisor LTE se suman a la vez y no uno por uno ya que se encuentran en serie.

$$Leakage = 10 \times \log_{10} \left(10^{\frac{efectoRF_{TDT}[dB] + efectoIF_{TDT}[dB]}{10}} + 10^{tx_{LTE}[dB]/10} \right)$$

	Canal 60	Canal 59	Canal 58
Canal A	-47 dB	-49 dB	-51 dB
Canal B	-49 dB	-51 dB	-53 dB
Canal C	-51 dB	-53 dB	-55 dB

Tabla 10. Efecto del leakage del sistema LTE sobre el sistema TDT

4.5 Desarrollo del programa

En este capítulo se va a analizar con detalle los programas implementados para el estudio que se está llevando a cabo en este Trabajo de Fin de Grado. Se aplican los escenarios explicados en el apartado 4.2 y se observa el comportamiento de estos en las distintas bandas de frecuencia adyacentes.

Para desarrollar ambos casos se emplean los parámetros explicados en el Anexo A para calcular el modelo de propagación analizado en el apartado 4.1, el radio de cobertura de la estación base del sistema LTE explicado en el apartado 4.3 y el efecto del *leakage* analizado en el apartado 4.4.

4.5.1 Señal TDT interfiere sobre señal LTE

Una vez vista la teoría acerca del *leakage* y la problemática entre los sistemas TDT y LTE, se va a simular este escenario en la plataforma de desarrollo *Matlab*. Para proceder en dicha simulación, el código se compone de un bucle principal, donde se ejecuta la función *plot* para representar los resultados calculados, y dentro de este bucle se crean dos bucles *for* anidados. El primero de ellos recorre los distintos valores que toma el radio de cobertura de la estación base LTE y el segundo recorre los distintos ángulos que puede tomar la estación base respecto al usuario móvil.

Dentro de éstos se aplica la siguiente fórmula para calcular la señal de transmisión de LTE:

$$S[dB] = PIRE_{LTE} - G_{rxLTE} - L_{hataLTE} - L_{multitrayecto} - L_{shadowing}$$

donde:

- ❖ $PIRE_{LTE}$ es la suma de la ganancia y potencia de transmisión del sistema LTE. Se mide en dBm.
- ❖ G_{rxLTE} es la ganancia receptora del sistema LTE. Se mide en dB.
- ❖ $L_{hataLTE}$ son las pérdidas de propagación del modelo Hata que dependen del radio de cobertura del sistema LTE. Se mide en dB.

Posteriormente, se aplica la siguiente fórmula para calcular la señal interferente del sistema TDT:

$$I[dB] = P_{txTDT} + G_{txTDT} + Leakage + G_{rxLTE} - L_{hataTDT} - L_{multitrayecto} - L_{shadowing}$$

donde:

- ❖ P_{txTDT} es la potencia de transmisión del sistema TDT. Se mide en dBm.
- ❖ $L_{hataTDT}$ son las pérdidas de propagación del modelo Hata que dependen de la distancia que hay entre el sistema LTE y sistema TDT (d_{TDT}). Se mide en dB.

$$x_{TDT} = dist_{SI} \times cosd(angulo_{SI}) \quad x_{LTE} = d_{LTE} \times cosd(angulo)$$

$$y_{TDT} = dist_{SI} \times send(angulo_{SI}) \quad y_{LTE} = d_{LTE} \times send(angulo)$$

$$d_{TDT}[km] = \sqrt{(x_{TDT} - x_{LTE})^2 + (y_{TDT} - y_{LTE})^2}$$

donde:

- ❖ $dist_{SI}$ es la distancia entre la estación base LTE y la antena TDT.
- ❖ $angulo_{SI}$ es el ángulo entre la estación base LTE y la antena TDT.
- ❖ d_{LTE} es la iteración del primer bucle.
- ❖ $angulo$ es la iteración del segundo bucle.

En este caso no se aplican las pérdidas de propagación por espacio libre ya que la antena del móvil de los usuarios LTE es interna a una altura de 1.5 m.

Por otro lado, G_{txTDT} es la ganancia de la antena transmisora TDT y se calcula de la siguiente forma:

$$G_{txTDT}[dB] = \max \left(G_{maxtx_TDT} - 12 \times \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, -15 \right)$$

donde:

- ❖ G_{maxtx_TDT} es la ganancia máxima de la antena TDT. Se mide en dB.
- ❖ $\theta_{3dB} = 10^\circ$
- ❖ $\theta(^{\circ}) = \tan^{-1} \left(\frac{h_{txTDT} - h_{usuario}}{d_{TDT}} \right)$ (ver Figura 19)

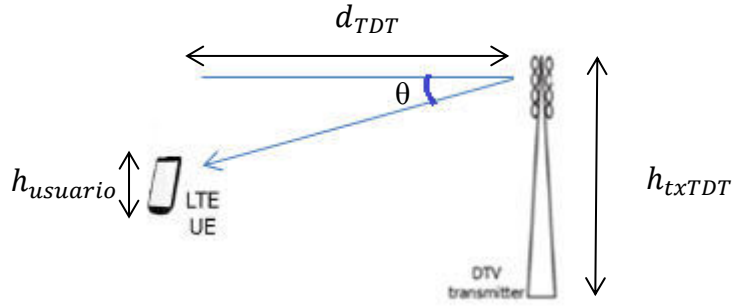


Figura 19. Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena TDT

Una vez calculados los valores de la señal y la interferencia se deduce el valor de la SINR:

$$P_{nreal} = 10^{(P_n/10)}$$

$$I_{real} = 10^{(I/10)}$$

$$SINR[dB] = S[dB] - 10 \times \log_{10}(P_{nreal} + I_{real})$$

Si se cumple que el valor de SINR calculado es mayor que el SINR de la modulación escogida, significa que hay cobertura y por tanto pinta un punto. Se repite tantas veces como valores tenga el bucle principal y al final se obtiene una imagen en la que se verá en que zonas hay cobertura y en cuáles no.

4.5.2 Señal LTE interfiere sobre señal TDT

En este caso se realizan los mismos pasos que en el apartado 4.5.1 pero con algunos cambios, como el intercambio entre la señal y la interferencia.

El cálculo del valor de la señal de la antena TDT es:

$$S[dB] = PIRE_{TDT} + G_{rxmax_Yagi} - L_{hataTDT} - L_{multitrayecto} - L_{shadowing} + efecto_{RF}$$

donde:

- ❖ $PIRE_{TDT}$ es la suma de la ganancia y potencia de transmisión del sistema TDT. Se mide en dBm.
- ❖ G_{rxmax_Yagi} es la ganancia máxima de la antena Yagi. Se mide en dB.
- ❖ $L_{hataTDT}$ son las pérdidas de propagación del modelo Hata que dependen de la distancia entre la estación base LTE y la antena TDT (d_{TDT}). Se mide en dB.
- ❖ $efecto_{RF}$ es el efecto que introduce el filtro RF sobre en los canales TDT por ser un filtro no ideal. Se mide en dB.

- ❖ Posteriormente, se aplica la fórmula de las pérdidas por espacio libre, y no la del modelo Hata, para calcular la señal interferente del sistema LTE, ya que la antena Yagi no cumple con una de las especificaciones del modelo Hata: su altura es de 15 m.

$$L_{fs} = 32.4 + 20 \times \log_{10}(d_{LTE}) + 20 \times \log_{10}(f)$$

$$I[dB] = P_{txLTE} + G_{txLTE} + Leakage + G_{rxLTE_Yagi} - L_{fs} - L_{multitrayecto} - L_{shadowing}$$

donde:

- ❖ P_{txLTE} es la suma de la ganancia y potencia de transmisión del sistema LTE. Se mide en dBm.
- ❖ G_{txLTE} es la ganancia de la antena transmisora LTE y se calcula de la siguiente forma:

$$G_{txLTE}[dB] = \max\left(G_{maxtx_LTE} - 12 \times \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, -15\right)$$

donde:

- G_{maxtx_LTE} es la ganancia máxima de la antena LTE. Se mide en dB.
- $\theta_{3dB} = 8^\circ$
- $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h_{BSLTE} - h_{usuario}}{d_{LTE} \times 1000}\right)$, donde d_1 es el índice del primero bucle (ver Figura 20)

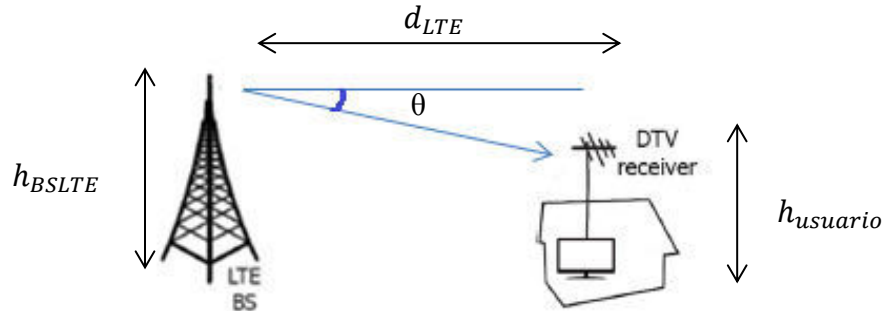


Figura 20. Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena LTE

- ❖ L_{fs} son las pérdidas de propagación por espacio libre que dependen del radio de cobertura de la estación base LTE. Se mide en dB.
- ❖ G_{rxLTE_Yagi} es la ganancia receptora de la antena Yagi, que se mide en dB, y se calcula así, ya que se tiene en cuenta el diagrama de radiación del plano vertical

de dicha antena y el ángulo que forma dicho usuario con respecto a las estaciones base DTV y LTE:

$$G_{rxLTE_Yagi}[dB] = \max\left(G_{rxmax_Yagi} - 12 \times \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, -3\right)$$

donde:

- $\theta_{3dB} = 45^\circ$
- $\theta = \cos^{-1}\left(\frac{dist_{SI}^2 - d_{LTE}^2 - d_{TDT}^2}{-2 * d_{LTE} * d_{TDT}}\right)$, donde d_{LTE} es el índice del primero bucle (ver Figura 21)

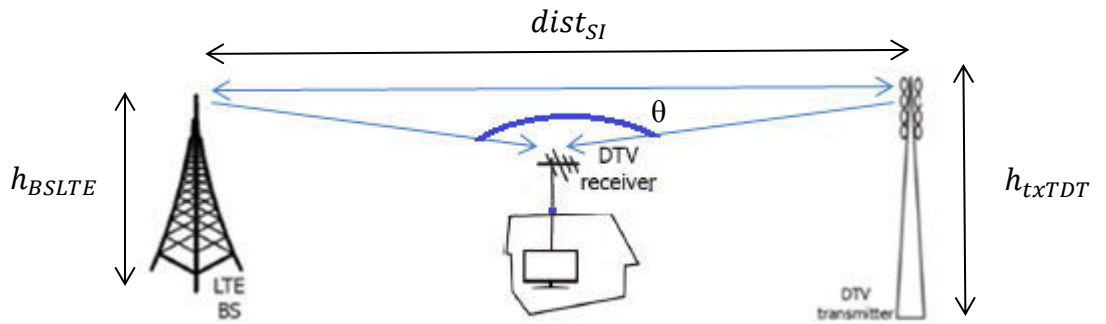


Figura 21. Representación del ángulo θ para cálculo ganancia antena Yagi

Una vez calculados los valores de la señal y la interferencia, se deduce el valor de la SINR como se ha demostrado en el apartado 4.5.1.

Si se cumple que el valor de SINR calculado es mayor que el SINR de la modulación escogida, significa que hay cobertura y por tanto dibuja un punto. Se repite tantas veces como valores tenga el bucle principal y al final se obtiene una imagen en la que se verá en que zonas hay cobertura y en cuáles no.

5 Resultados

En este capítulo se van a analizar los resultados obtenidos para los escenarios comentados en el apartado 4.2. Para obtener los distintos efectos que un sistema tiene sobre otro y viceversa se varía la distancia que hay entre la señal y la interferencia. Para desarrollar este estudio se emplea una banda de frecuencia de 800 MHz, y una modulación QPSK.

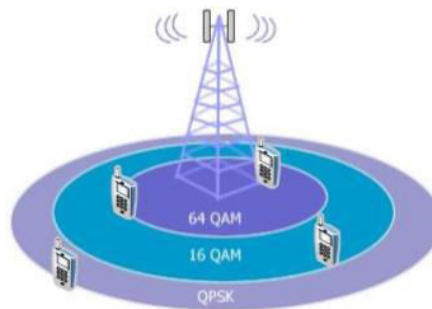


Figura 22. Modulaciones LTE [20]

En este estudio la estación base LTE se encuentra en el centro de la celda, mientras que el sistema TDT se encuentra al norte respecto a la estación base, es decir, a un ángulo de 90°.

Por falta de espacio se presentan los peores casos, es decir, el efecto del canal 60 del sistema TDT sobre el canal A del sistema LTE y el impacto del canal A del sistema LTE sobre el canal 60 del sistema TDT.

5.1 Señal TDT interfiere sobre señal LTE

En este escenario se analiza el efecto que producen los canales 58,59 y 60 del sistema TDT sobre los canales A, B y C del sistema LTE. A continuación se muestran los parámetros que varían en el efecto del canal 60 del sobre el canal A junto con los resultados obtenidos y los comentarios respectivos. El resto de casos se encuentran en el Anexo C.

5.1.1 Impacto de canal 60 sobre canal A

Los parámetros calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-51.5
Filtro IF [dB]	-18
Duplexor [dB]	-13
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 11. Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal A

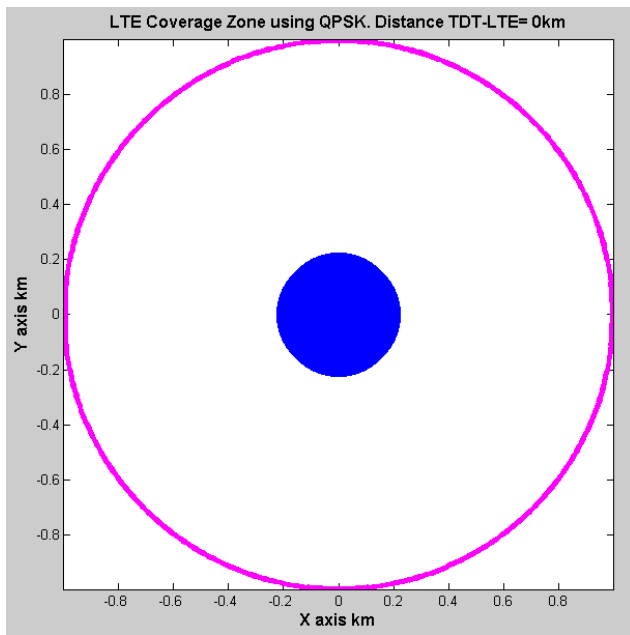


Figura 23. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 0 m

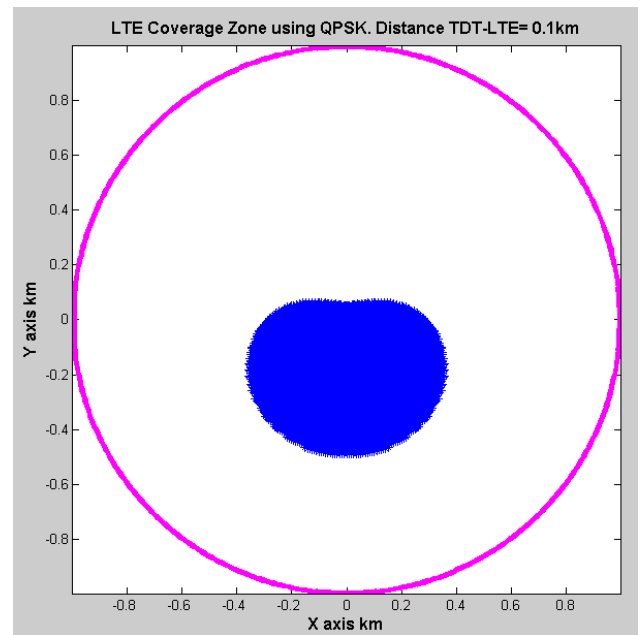


Figura 24. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 100 m

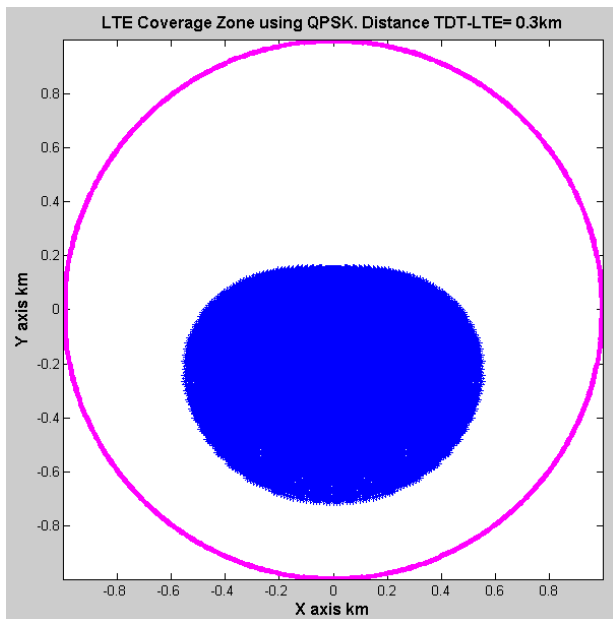


Figura 25. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 300 m

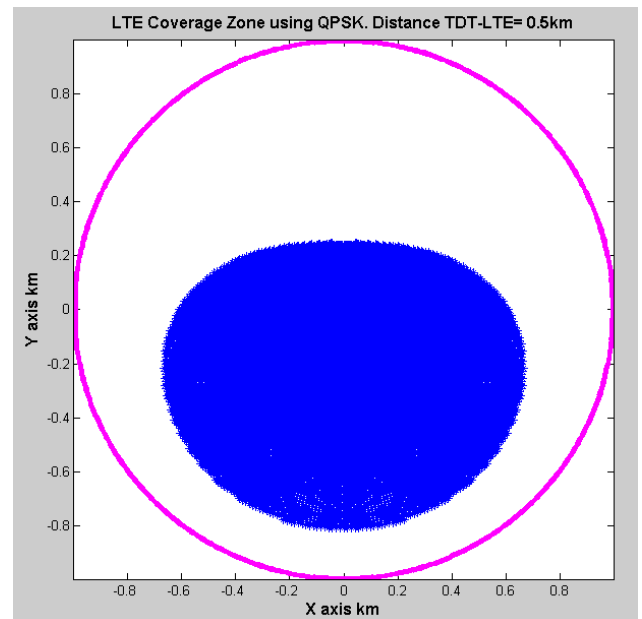


Figura 26. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 500 m

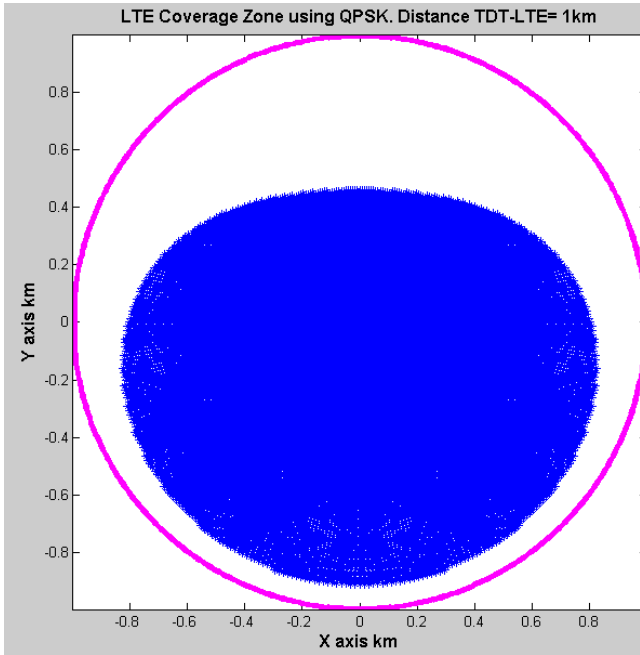


Figura 27. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km

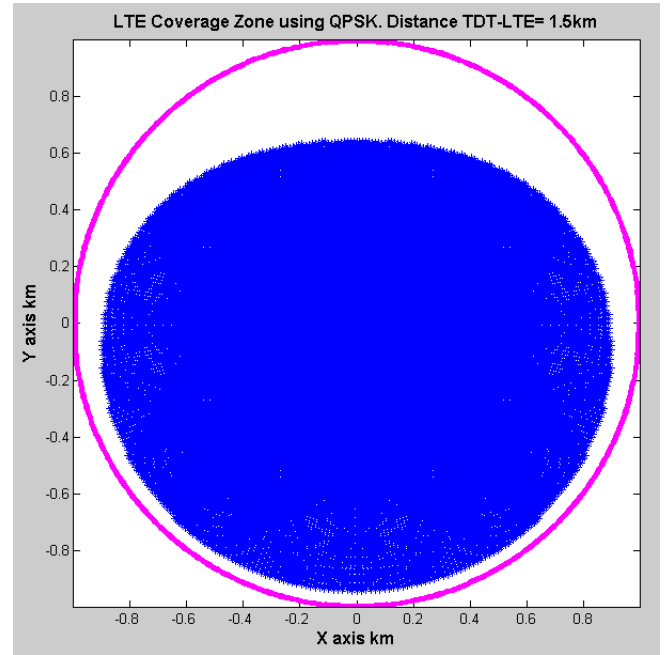


Figura 28. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km

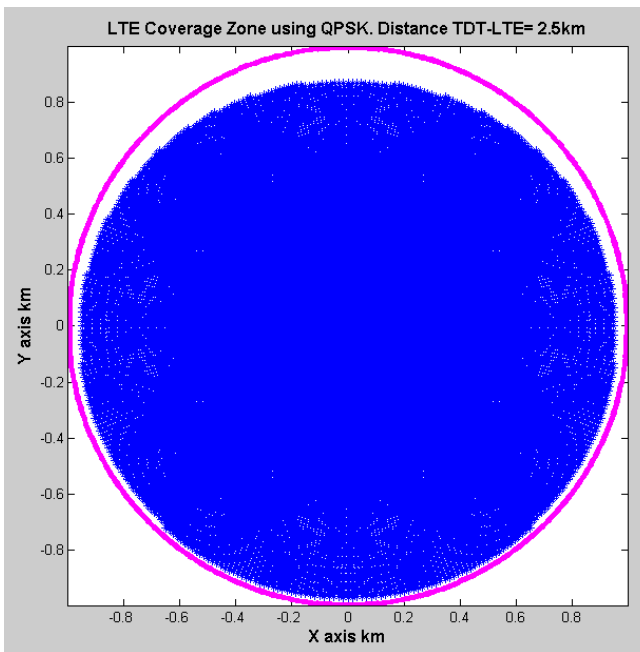


Figura 29. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:2.5 km

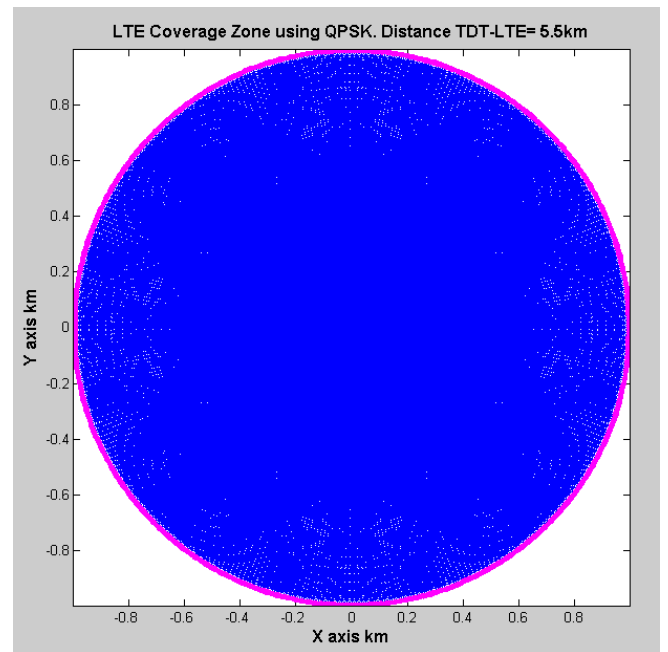


Figura 30. Zona de cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:5.5 km

Se observa en la Figura 23 que al encontrarse la estación base LTE superpuesta con la estación transmisora TDT, es decir, a una distancia de 0 km, existe algo de cobertura alrededor de la estación base LTE central, ya que además de tenerse en cuenta el efecto del diagrama de radiación de la antena TDT en el plano vertical, la potencia que se transmite hacia abajo y cerca de la antena TDT es pequeña.

Hay casos, como los que se observan en la secuencia de imágenes de la 24 a la 29, donde la señal LTE no llega a todas las partes del radio de cobertura por igual, no mostrándose un círculo regular. Esto es debido a que los usuarios que se encuentran dentro de la zona donde el transmisor apunta directamente y están más cerca de él, producen más interferencias que en aquellas zonas donde el transmisor apunta indirectamente o están más alejados, en cuyo caso el efecto es menor. Por la parte inferior de la imagen se deduce que la señal del transmisor TDT afecta en menor medida a los usuarios, ya que es la zona más alejada del transmisor, por lo que la intensidad de la señal aumenta y la cobertura es cada vez mayor; mientras que, si se observa la parte superior de la imagen, al estar más próximos a la zona del transmisor TDT, produce mayor efecto y por esta razón, la cobertura es mínima y se producen más interferencias.

La distancia va aumentando entre ambos sistemas hasta que ésta es tan grande que el efecto de un sistema sobre otro es prácticamente nulo, consiguiendo de nuevo cobertura plena. Esto se observa en la Figura 30.

En los resultados obtenidos se observa que debido a la poca separación que existe entre el canal 60 de TDT y el canal A de LTE, que es de 1 MHz, las interferencias que se producen son mucho mayores que en el resto de casos. Por esta razón, hay que tener mucho cuidado en cómo se colocan los transmisores de los sistemas para intentar perjudicar lo menos posible a los usuarios, ya que no les debería afectar de ninguna manera.

5.2 Señal LTE interfiere sobre señal TDT

En este escenario se observa el efecto que producen los canales A, B y C del sistema LTE sobre los canales 58, 59 y 60 del sistema TDT. Después se muestran los parámetros que varían en el efecto del canal A del sobre el canal 60 junto con los resultados obtenidos y los comentarios respectivos. El resto de casos están en el Anexo D.

5.2.1 Impacto de canal A sobre canal 60

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-47
Filtro IF [dB]	-47
Filtro RF [dB]	-40.6
Efecto RF-TDT[dB]	-16.3
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 12. Parámetros del efecto del canal A sobre canal 60

Coexistencia entre los sistemas LTE y DTV en la banda de 800 MHz

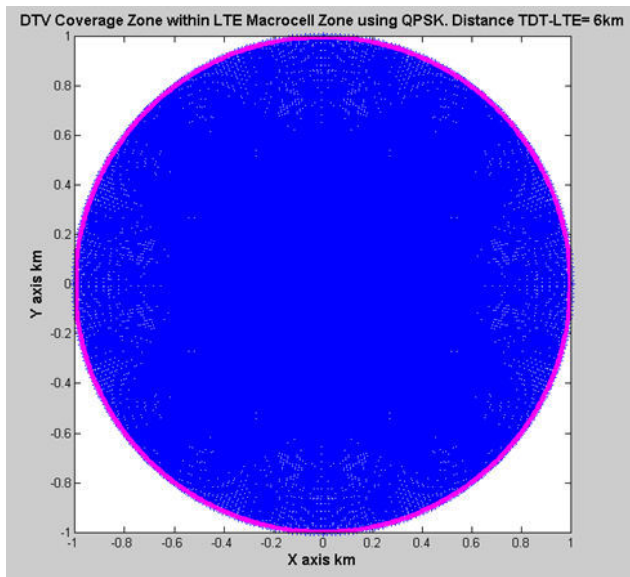


Figura 31. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:6km

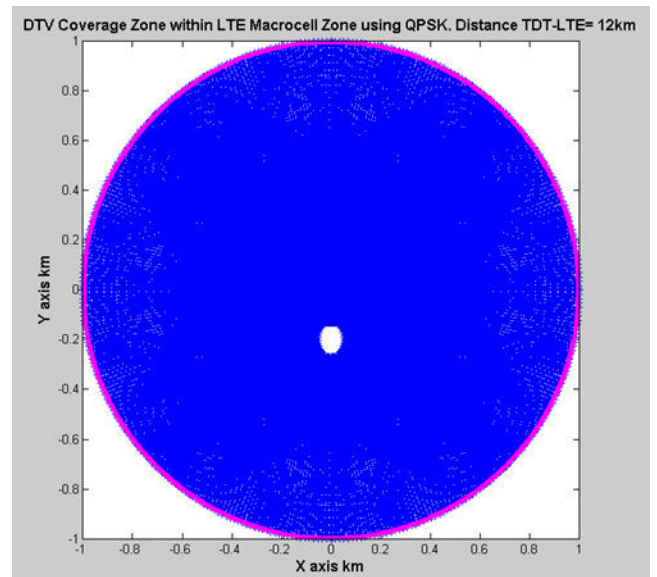


Figura 32. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:12km

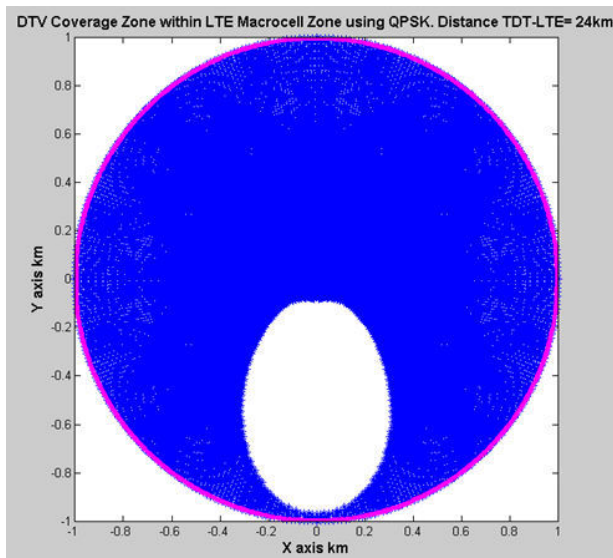


Figura 33. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24km

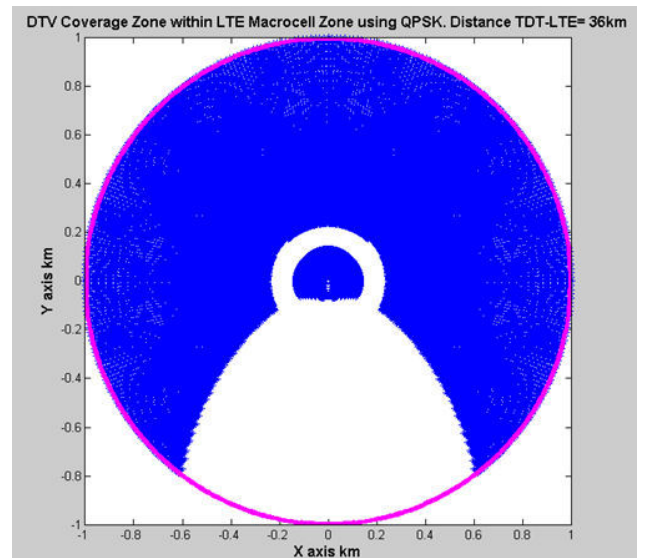


Figura 34. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36km

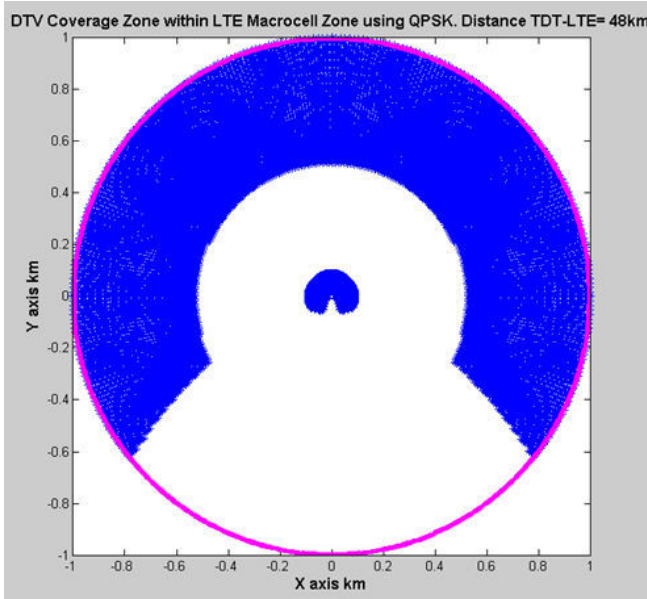


Figura 35. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48km

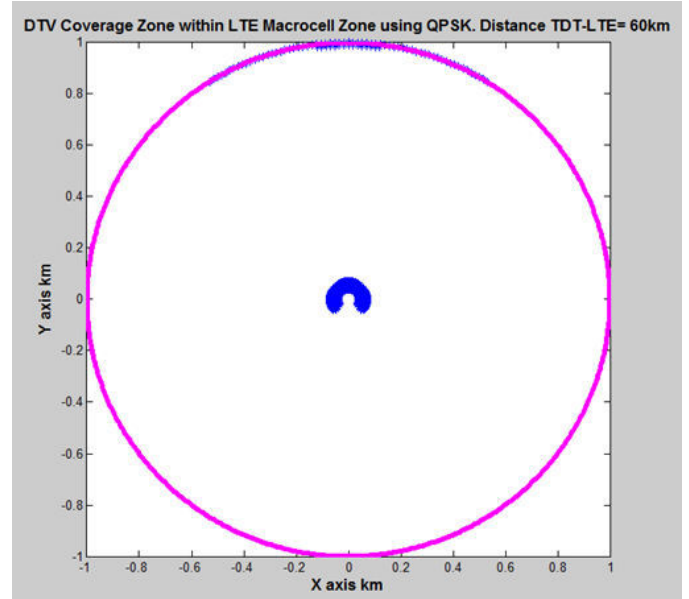


Figura 36. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60km

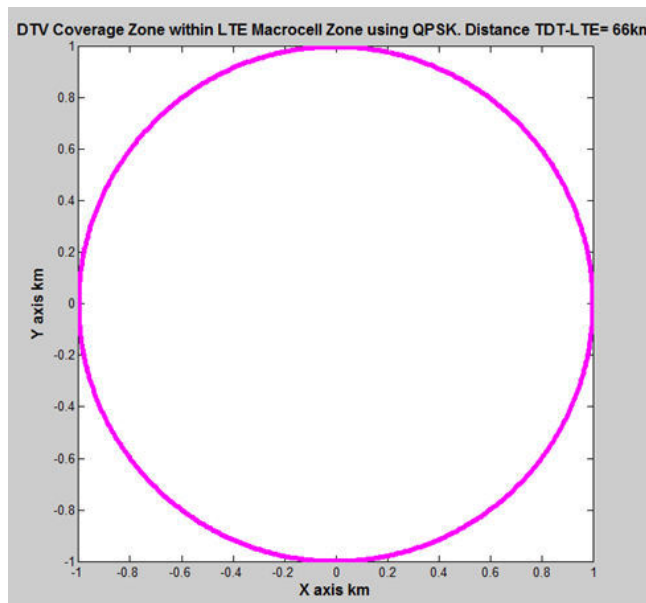


Figura 37. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66km

En las imágenes se observa que cuánta menor sea la distancia entre la estación base LTE y la estación transmisora TDT, mayor cobertura tendrá TDT dentro de la macrocelda LTE. A medida que esa distancia va aumentando, la cobertura en las zonas cercanas y en el centro de la estación base LTE va disminuyendo, pero va aumentando la interferencia que produce la señal LTE sobre el sistema TDT. Hay cobertura en la zona central de la estación base LTE debido al efecto del diagrama de radiación vertical de las antenas.

Como se observa en la Figura 37, con una distancia de 60 km entre ambas estaciones transmisoras, debido a que la intensidad de la señal LTE en ese momento es alta y la señal TDT en los puntos tan distantes es baja, la cobertura es nula en el radio de cobertura calculado para la modulación QPSK.

Como en el escenario anterior, dependiendo de la posición en la que se encuentren los usuarios con respecto a los sistemas LTE y TDT, las señales afectan de una manera u otra a los clientes. Por esta razón, como la antena de la estación base LTE transmite la señal dirección sistema TDT, la antena TDT transmite señal con dirección al sistema LTE y además, el usuario recibe la señal con la antena posicionada en la misma dirección que la del sistema LTE (apuntando hacia la estación transmisora TDT), las interferencias más altas se producen alrededor del transmisor LTE y en las zonas más alejadas del transmisor TDT.

Debido a la poca separación (1 MHz) que existe entre el canal superior del sistema TDT, el canal 60, y el canal inferior del sistema LTE, el canal A, se considera el peor caso del escenario 2. Esa distancia es la banda de guarda impuesta por el Dividendo Digital (DD).

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha expuesto el estudio realizado sobre la coexistencia entre los sistemas LTE y TDT.

Desde siempre la televisión analógica utilizó la banda de frecuencia de 470 MHz a 862 MHz para su emisión. Con la llegada de la tecnología digital, se empleó de forma más eficiente el espectro radioeléctrico, ya que lo que antes se hacía en 4 canales después del cambio se efectúa en 1, además de liberar parte del espectro. Esta parte sobrante se destinó al uso de la telefonía móvil. Así, como esta tecnología ocupa la banda de 800 MHz, el último canal de la Televisión Digital Terrestre (TDT) acaba en una frecuencia de 790 MHz, mientras que el primer canal de la tecnología 4G empieza en una frecuencia de 791 MHz. Con estos datos, se observa que la separación entre ambos sistemas es de 1 MHz. Debido a esta distancia, resultó necesario desarrollar un estudio para concluir qué efecto producían las interferencias entre ambas tecnologías sobre los usuarios que se encuentran en la zona de cobertura de la estación base LTE.

Para llevar a cabo este proyecto se han ejecutado dos escenarios distintos basándose en la información que se ha presentado durante todo el documento.

En el Escenario 1, se estudia el impacto que tiene la señal TDT sobre la señal LTE y según los resultados, se ha concluido que cuánta más distancia haya entre el transmisor TDT y la estación base LTE menos interferencias habrá y, por tanto, la zona de cobertura será mayor.

En el Escenario 2, se analiza el caso contrario: el efecto que produce la señal LTE sobre la señal TDT. En este caso, a partir de los resultados obtenidos, se ha deducido que las estaciones base deben estar lo más cerca posible para que la zona de cobertura no disminuya. Esto es un problema ya que esta situación resulta complicada. La única solución útil sería aumentar la banda de guarda.

6.2 Trabajo futuro

Tras el desarrollo del proyecto, se proponen algunas líneas futuras de investigación:

- Realizar un estudio sobre el coste y las ventajas que contiene cada uno de estos escenarios, compararlos y estudiar cuál es la mejor opción.
- Ampliación de este Trabajo de Fin de Grado para casos en los que se transmitan varias señales TDT afectando a las señales de LTE y viceversa.
- Estudio real de la coexistencia de los sistemas TDT y LTE.
- Estudio del efecto de un posible filtro paso banda en la salida de la estación base LTE que se utiliza para atenuar la señal LTE fuera de la banda LTE.

7 Referencias

- [1] CEPT Report 30: "The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790–862 MHz for the digital dividend in the European Union," ECC, 30 Oct. 2009
- [2] L. Polak et al., "Study of coexistence between indoor LTE femtocell and outdoor-to-indoor DVB-T2-Lite reception in a shared frequency band", EURASIP J. Wireless Commun. Netw., Apr. 2015
- [3] DVB SB2122, "Study on specification and use of in-line filters to reduce interference in broadcast bands from mobile base stations", DVB White Paper, Mar. 2014
- [4] "Recommendations on DTT interference avoidance from LTE transmissions", Digital Europe, Brussels, December 21, 2012
- [5] "Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interference into DTT Receivers", ERA Technology, July 2011
- [6] "Plan marco de actuaciones para la liberación del dividendo digital", Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2012-2014
- [7] Profesor Narcís Cardona, "Coexistence of Broadcast and Mobile Technologies in Digital Dividend Bands", Universitat Politècnica de Valencia, 19 Mayo 2014
- [8] Manuel Fuentes Muela, "Coexistencia entre servicios TDT y 4G en la banda de 700MHz", Grupo de Comunicaciones Móviles (MCG) – iTEAM, 4 Febrero 2013
- [9] "Estándar DVB-T", Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ANSP), Mayo 2009
- [10] Jose Fernando Restrepo Piedrahita, "Análisis y estudio técnico de la transferencia de tecnología para la prestación de servicios de telefonía y banda ancha móvil en Colombia a través de operadores móviles virtuales soportados por tecnología LTE", Universidad Nacional de Colombia, 2011
- [11] Víctor Torres, Fermín Esparza, Francisco Falcone, "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ESQUEMAS DE MODULACIÓN ADAPTATIVOS EN LTE", Universidad Pública de Navarra, 2016

- [12] Mark Massel, “*Digital Television: DVB-T, COFDM, and ATSC 8.VSB*”, Reino Unido, Octubre 17,2008
- [13] “*Technical analysis of interference from mobile network base stations in the 800 MHz band to digital terrestrial television*”, Ofcom, 10 Junio, 2011
- [14] “*Medición de emisiones en banda lateral de los transmisores T-DAB y DVB-T a efectos de comprobación técnica*”, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Febrero 2007
- [15] Duplexor. 856979 806/847 MHz Duplexer Datasheet. TriQuint SEMICONDUCTOR. Estados Unidos. 2012
- [16] Filtro IF. 854660 70 MHz SAW Filter Datasheet. SAWTEK(a TriQuint company).Estados Unidos. 2005.
- [17] “*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD) (Release 9)*”. 3GPP. Francia.2009
- [18] Filtro RF. *LTE Filter SLTE 90 Premium*.SPAUN electronic GmbH & Co.KG. Alemania. 2015.
- [19] Filtro paso banda. *X 7253 D 36 MHz SAW Filter Datasheet*. TDK. Alemania.2011
- [20] “*Call Admission Control in 3GPP LTE Systems at High Vehicular Communications*”, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 3, 2014

API	Application Programming Interface
1G	Primera Generación
2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Cuarta Generación
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DD	Dividendo Digital
DL	<i>Downlink</i>
DTV	<i>Digital Television</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiple</i>
Gbps	<i>Giga bits per second</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	Interferencia Intersimbólica
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
kbps	<i>kilo bits per second</i> 82
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution – Advanced</i>

Mbps	<i>Mega bits per second</i>
mhp	<i>Multimedia Home Platform</i>
MHz	Megahercio
MIMO	<i>Multiple In Multiple Out</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	Radiofrecuencia
RRC	Conferencia Regional de Radiocomunicaciones
SINR	<i>Signal-to-interference-plus-noise ratio</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Divison Multiple Access</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDT	Televisión Digital Terrestre
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i> 83
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i>

Anexo A: Parámetros aplicados en estudio

Parámetros	Valor Escenario 1	Valor Escenario 2
Ganancia transmisora LTE (G_{maxtx_LTE})	15 dB	15 dB
Ganancia receptora LTE (G_{rxLTE})	0 dB	0 dB
PIRE TDT	75 dB	75 dB
Altura BS LTE (h_{BSLTE})	30 m	30 m
Altura estación TX TDT (h_{txTDT})	200 m	200 m
Altura usuario ($h_{usuario}$)	1.5 m	15 m
Potencia transmisor LTE (P_{txLTE})	43 dBm	43 dBm
Potencia transmisor TDT (P_{txTDT})	66 dBm	66 dBm
Posición TDT con respecto LTE (angulo_{SI})	90°	90.05°
Factor de ruido (NF)	7 dB	7 dB
Ancho de banda (B_w)	5 MHz	5 MHz
Frecuencia de trabajo (f)	800 MHz	800 MHz
Pérdidas por Multitrayecto LTE ($L_{multitrayectoLTE}$)	10 dB	10 dB
Pérdidas por Shadowing LTE ($L_{shadowingLTE}$)	10 dB	10 dB
Pérdidas por Multitrayecto TDT ($L_{multitrayectoTDT}$)	5 dB	1 dB
Pérdidas por Shadowing TDT ($L_{shadowingTDT}$)	5 dB	5 dB

Tabla 13. Parámetros aplicados

Se debe comentar que la antena Yagi y la antena de la estación base LTE no trabajan en la banda del estudio, pero tiene parámetros que se utilizan en el trabajo como ganancia, anchura de haz,...

Anexo B: Características antena Yagi

Las características de la antena Yagi empleada en este estudio son las siguientes:

Parámetros	Valor
Frequency Range	550-650(MHz)
Bandwidth	150(MHz)
Input Impedance	75(Ω)
VSWR	<1.5
Gain	12(dBi)
(3dB)HPBW	65°H-plane 55°E-plane
F/B	>15(dB)
Maximum Power	50(W)
Polarization	Vertical Polarization
Connector Type	F
Lighting Protection	Direct Ground
Wind Velocity	200(km/h)
Length	878(mm)
Structure	9 units
Weight	0.45(Kg)
Hold Pole Diameter	$\phi 40$ - $\phi 50$ (mm)

Tabla 14.Características antena Yagi

Anexo C: Señal TDT interfiere sobre señal LTE

C.1 Impacto de canal 60 sobre canal B

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-74
Filtro IF [dB]	-57
Duplexor [dB]	-13
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 15. Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal B

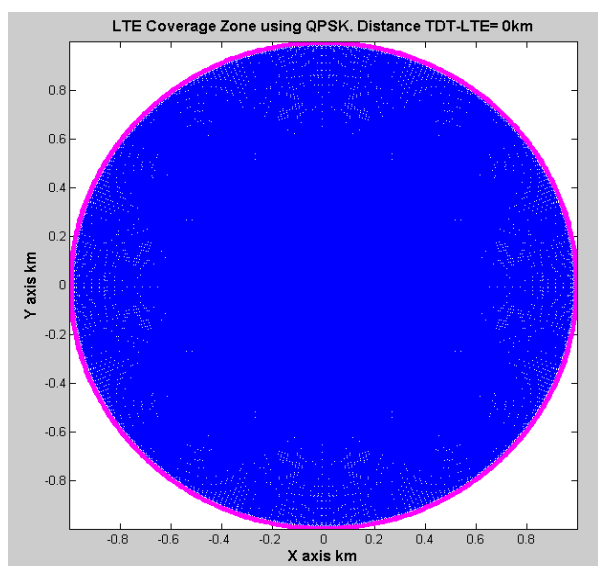


Figura 38. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m

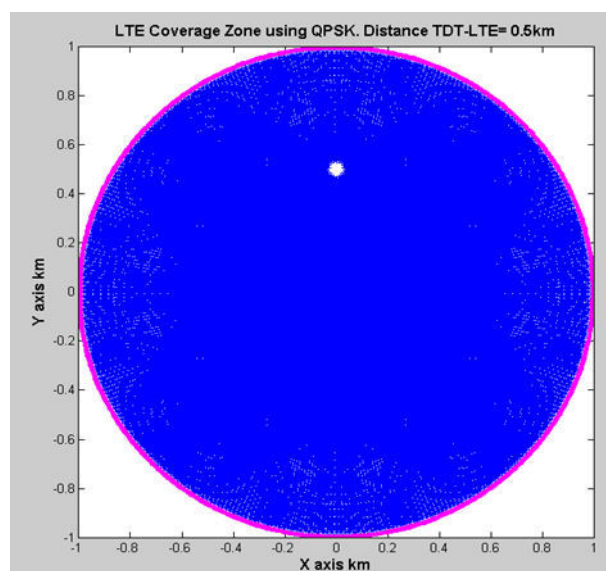


Figura 39. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m

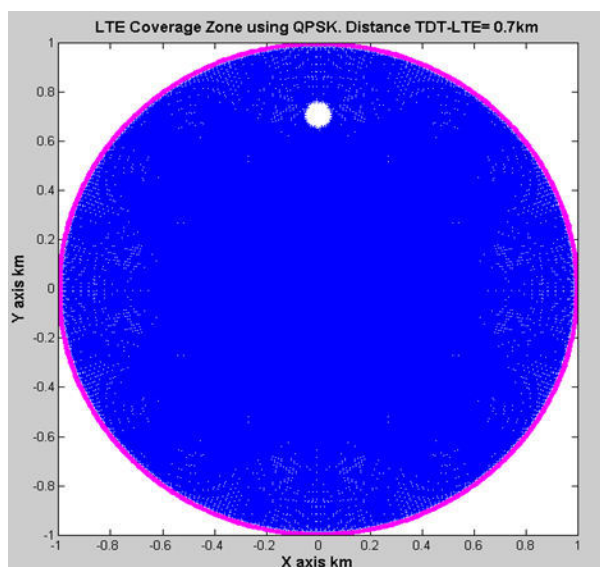


Figura 40. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m

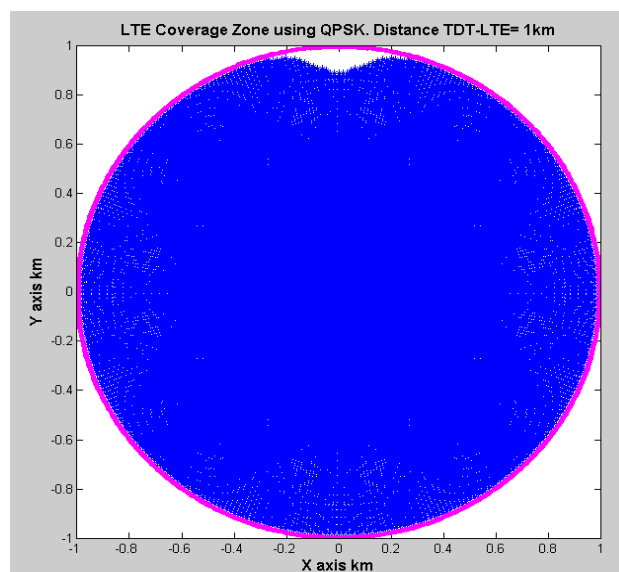


Figura 41. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km

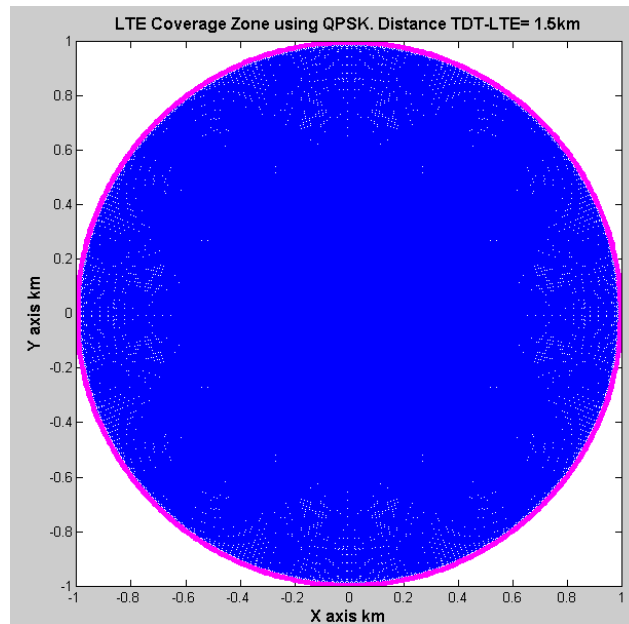


Figura 42. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km

Aplicando los parámetros comentados en la *Tabla 15*, y observando los resultados del caso anterior, los efectos que produce la señal TDT sobre la de LTE es menor, debido a que la separación entre ambos canales es mayor que en el caso del apartado 5.1.1.

En el momento en el que las estaciones transmisoras LTE y TDT se superponen, como se observa en la Figura 38, la señal LTE que llega al receptor tiene tanta intensidad que supera el SINR mínimo necesario para poder trabajar con la modulación QPSK, aunque la señal interferente del transmisor TDT sea también alta. Cuando ambas estaciones empiezan a distanciarse, los usuarios que se encuentran cerca del transmisor TDT reciben una señal interferente cada vez más fuerte, y al mismo tiempo, cuentan con una señal LTE cada vez más débil. Esto se va observando en las Figuras 39, 40 y 41.

La separación entre ambos transmisores llega a un punto en el que es tan grande que no se produce ningún efecto entre ambos sistemas, por lo que el radio de cobertura de la modulación QPSK vuelve a tener cobertura plena, como se observa en la Figura 42.

C.2 Impacto de canal 60 sobre canal C

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-78
Filtro IF [dB]	-60
Duplexor [dB]	-13
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 16. Parámetros del efecto del canal 60 sobre canal C

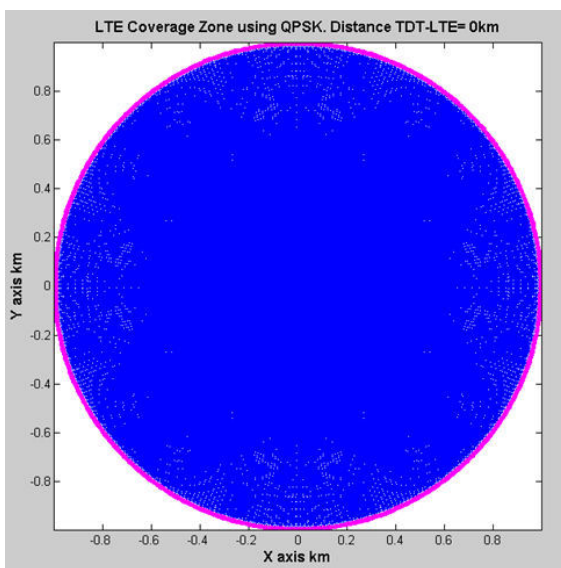


Figura 43. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 0 m

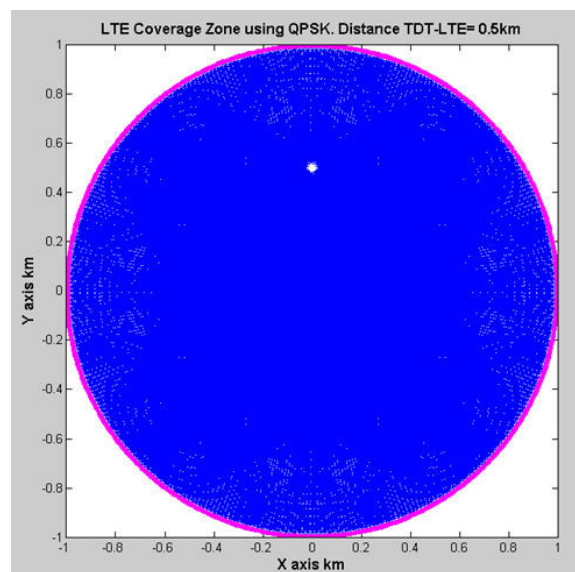


Figura 44. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 500 m

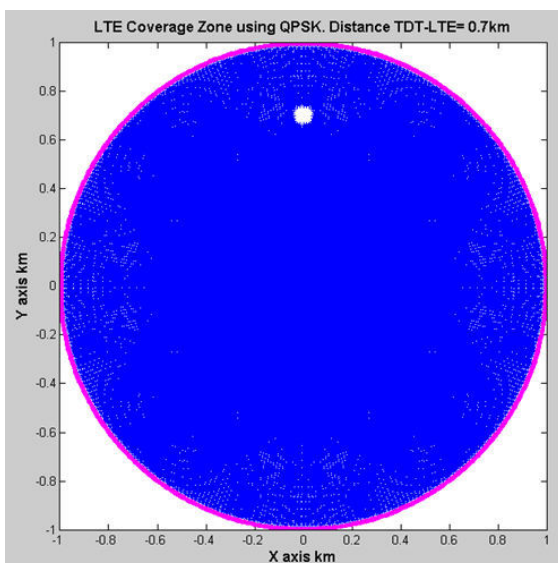


Figura 45. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 700 m

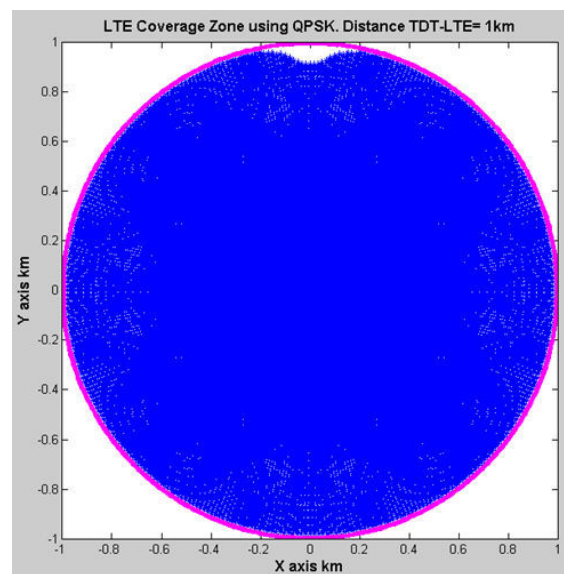


Figura 46. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1 km

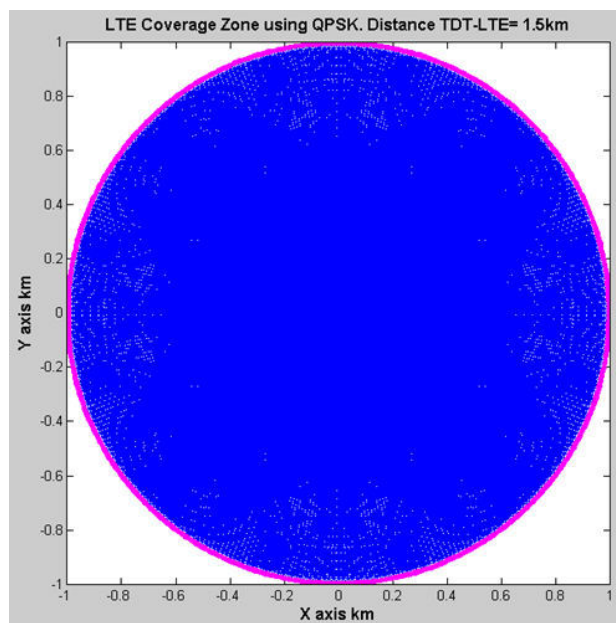


Figura 47. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km

Según las imágenes mostradas se observa que el efecto del sistema TDT sobre el sistema LTE es menor que el del apartado C.1, ya que en este caso la distancia entre el Canal 60 de TDT y el canal C de LTE es algo mayor, 11 MHz y, además tiene un *leakage* más bajo, como se observa en la *Tabla 5*, lo que hace que se obtengan mejores resultados.

C.3 Impacto de canal 59 sobre canal A

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-78
Filtro IF [dB]	-58
Duplexor [dB]	-41
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 17. Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal A

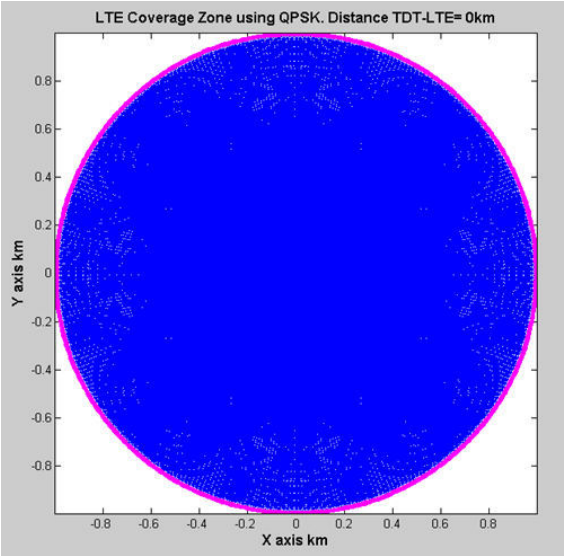


Figura 48. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m

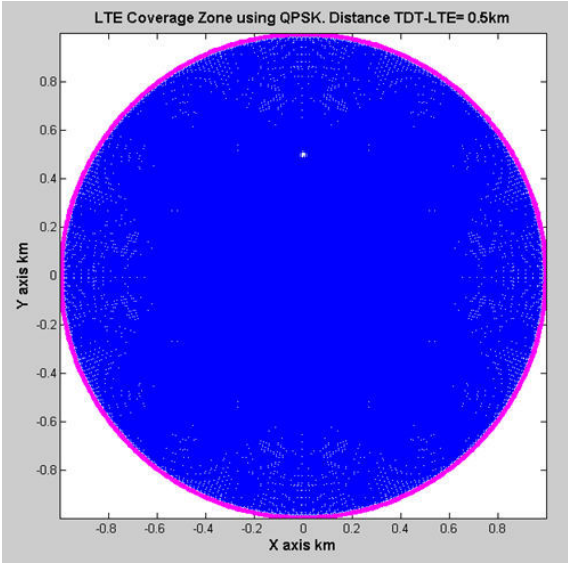


Figura 49. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m

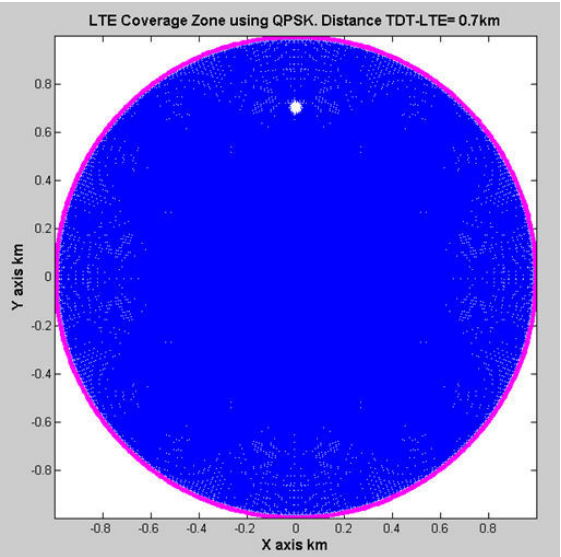


Figura 50. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m

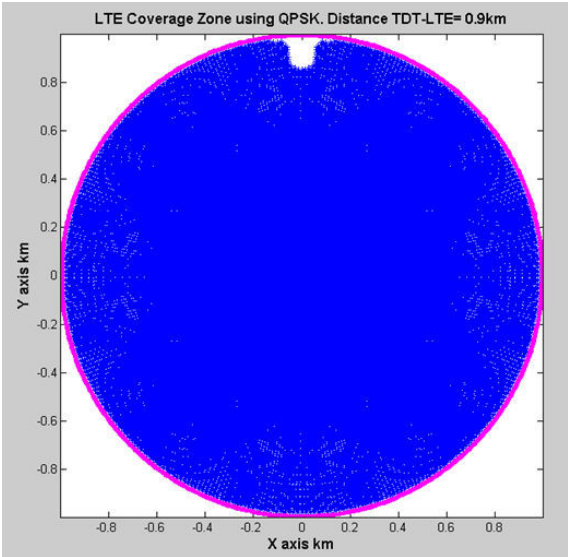


Figura 51. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m

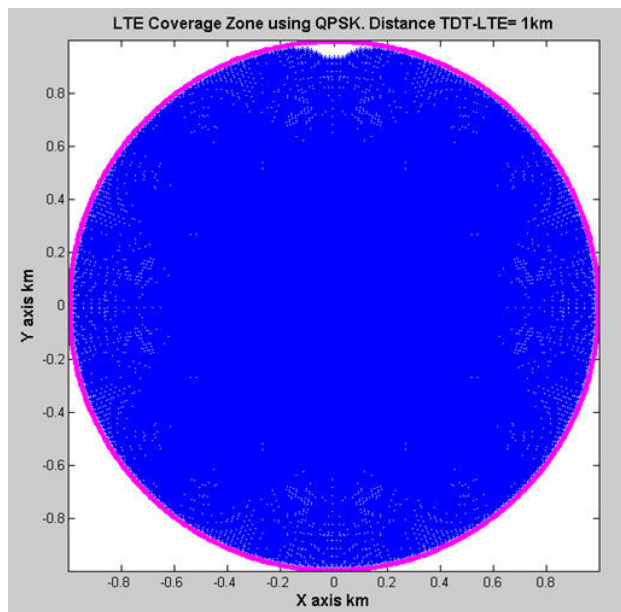


Figura 52. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1 km

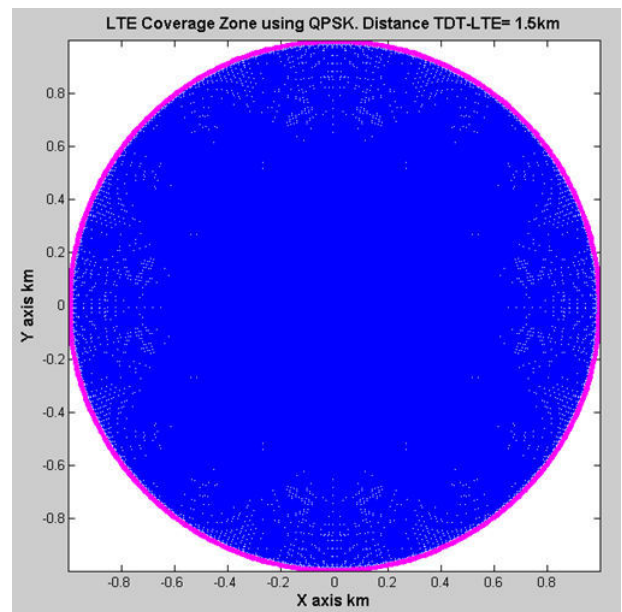


Figura 53. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:1.5 km

En las imágenes se observa un menor efecto de la señal TDT sobre la señal LTE respecto a los casos anteriores. Esto es así ya que la separación entre los canales 59 y A es de 9 MHz, 1MHz de la banda de guarda y 8 MHz del ancho de banda del canal 60 de TDT, que en este caso no se tiene en cuenta.

C.4 Impacto de canal 59 sobre canal B

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-78
Filtro IF [dB]	-62
Duplexor [dB]	-41
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 18. Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal B

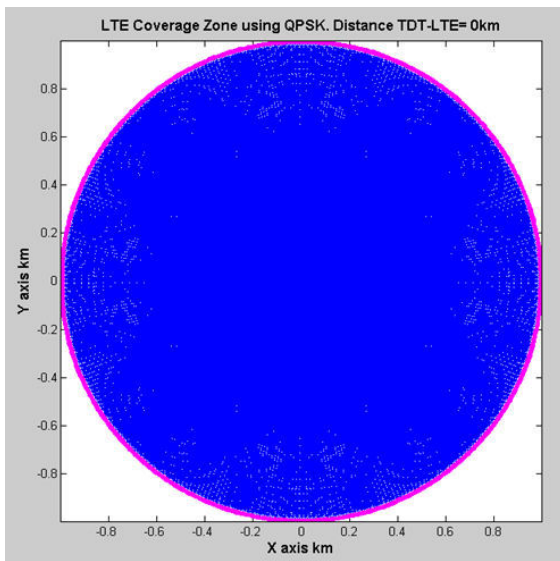


Figura 54. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 0 m

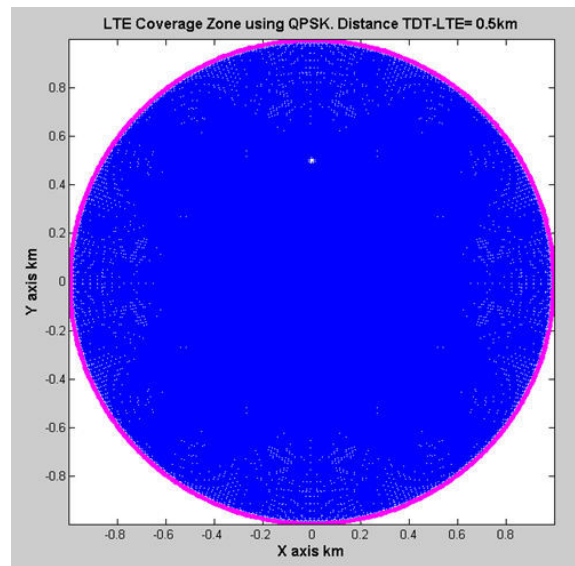


Figura 55. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 500 m

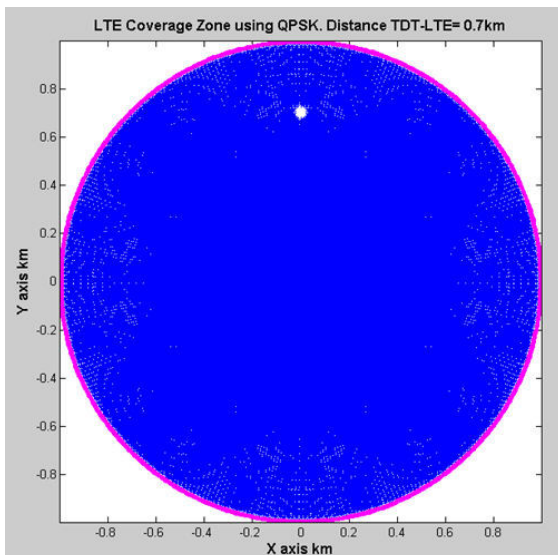


Figura 56. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 700 m

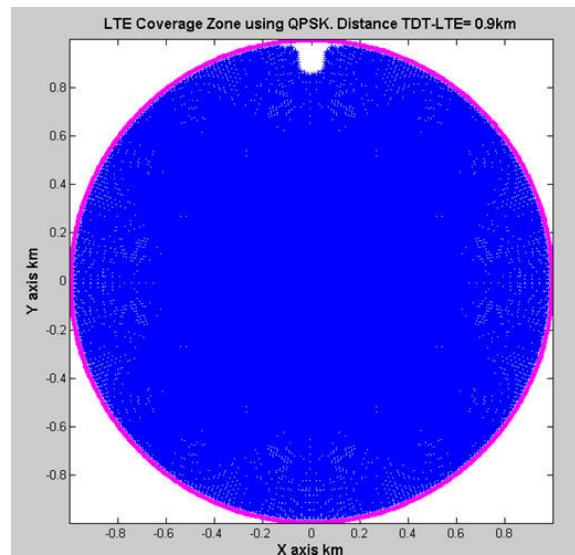


Figura 57. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 900 m

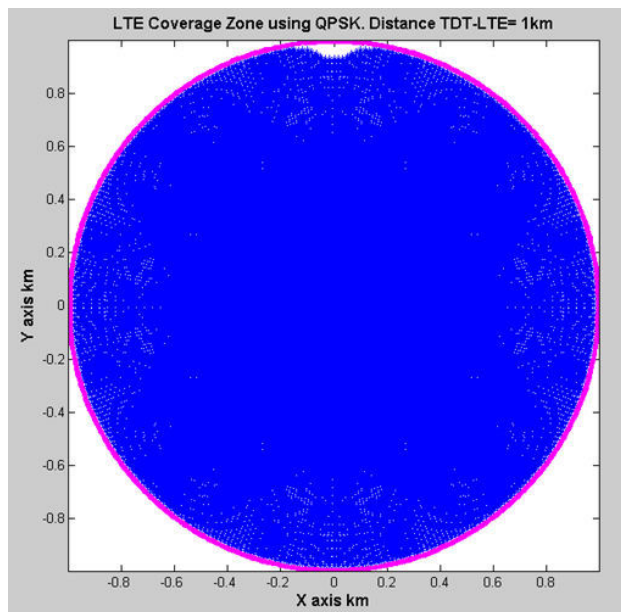


Figura 58. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1 km

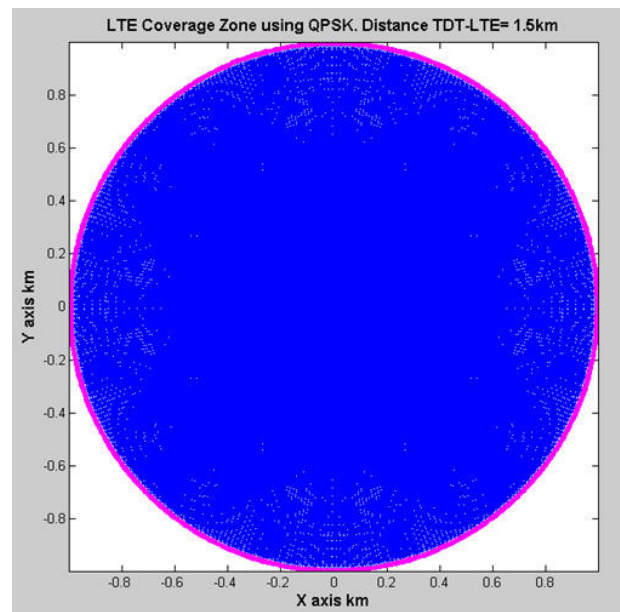


Figura 59. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1.5 km

Aplicando los parámetros de la *Tabla 18* se obtienen las figuras anteriores, donde se debería observar una gran mejora con respecto al caso anterior ya que la separación entre canales es mayor, pero este no es el caso: llega un momento en el que da igual la distancia que se interponga entre ambos sistemas que la zona de cobertura no aumenta. Esto es debido a las características no ideales de los elementos empleados en las simulaciones y a que el efecto del leakage sobre el sistema LTE es prácticamente el mismo.

C.5 Impacto de canal 59 sobre canal C

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-78
Filtro IF [dB]	-64
Duplexor [dB]	-41
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 19.Parámetros del efecto del canal 59 sobre canal C

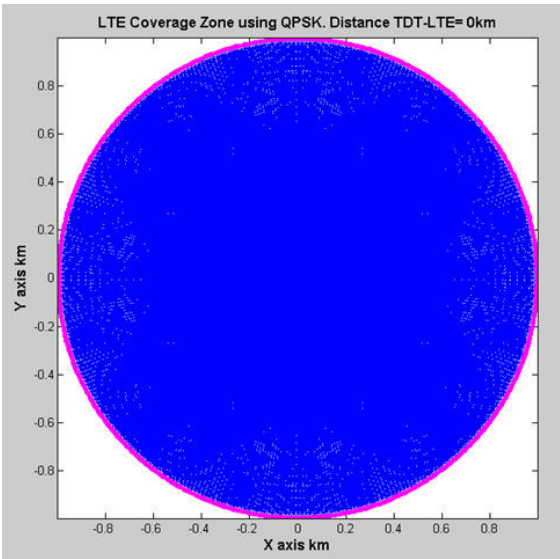


Figura 60. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:0 m

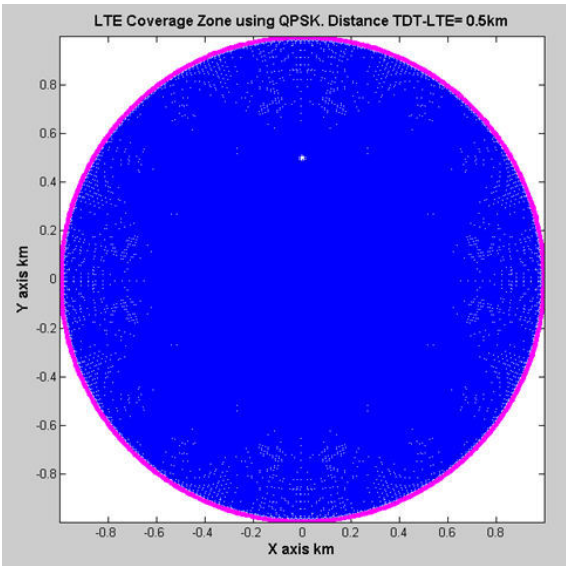


Figura 61. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:500 m

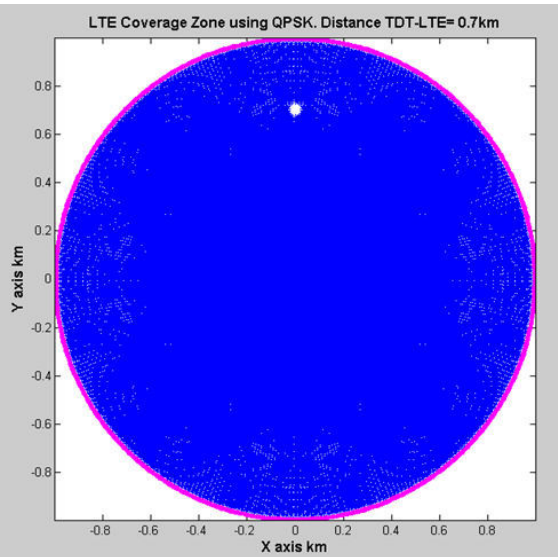


Figura 62. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:700 m

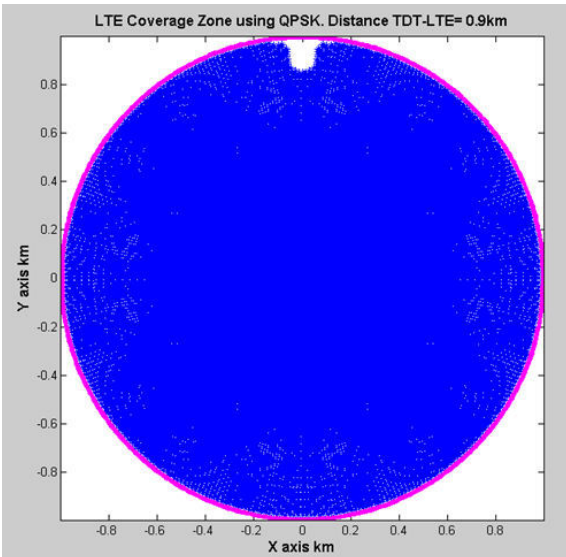


Figura 63. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX:900 m

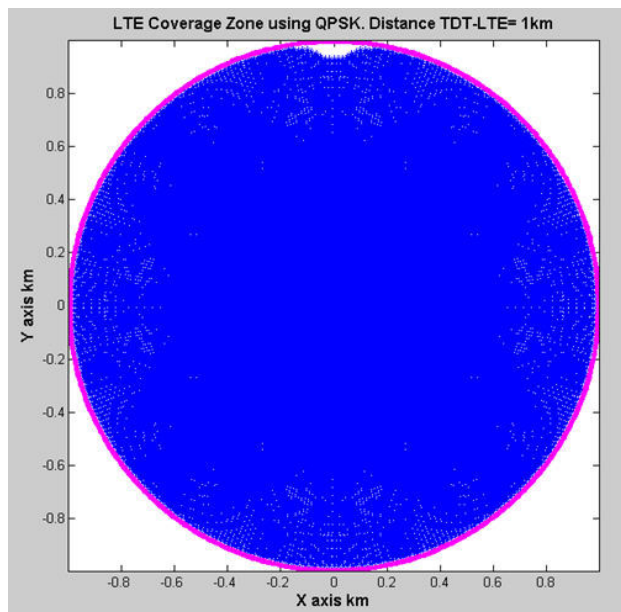


Figura 64. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1 km

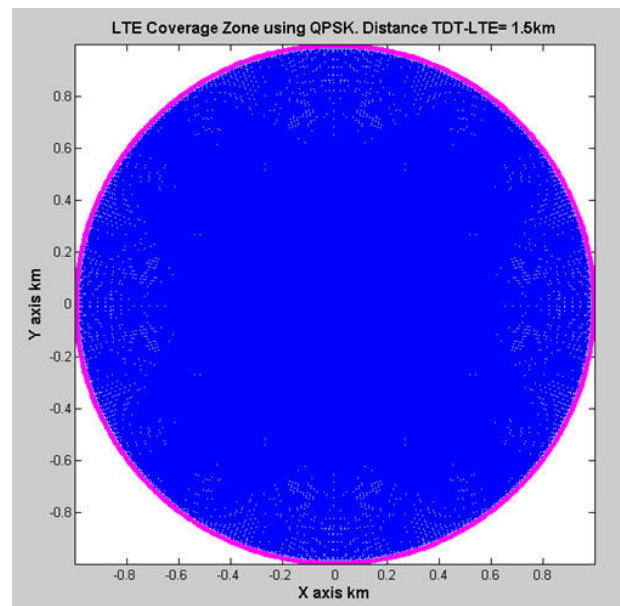


Figura 65. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1.5 km

Según las imágenes mostradas aunque la distancia entre ambos canales sea mayor que en los casos anteriores, ocurre lo mismo que en el apartado anterior: se ha llegado a la máxima mejora de cobertura en el apartado C.3.

C.6 Impacto de canal 58 sobre canal A, canal B y canal C

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX TDT [dB]	-78
Filtro IF [dB]	-65
Duplexor [dB]	-48
SINR QPSK [dB]	3.5

Tabla 20. Parámetros del efecto del canal 58 sobre canal A, B y C

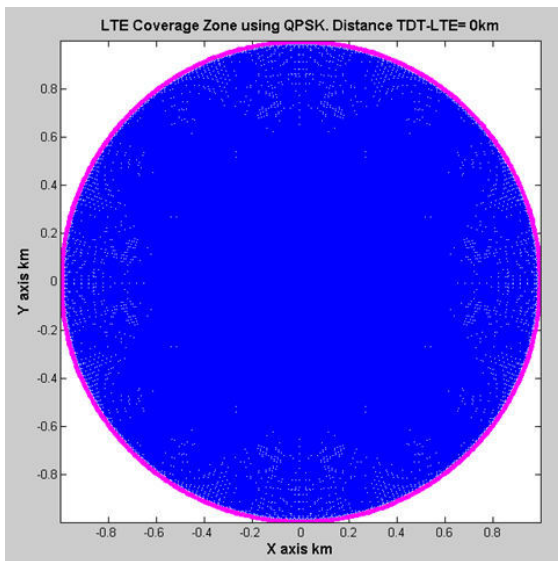


Figura 66. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 0 m

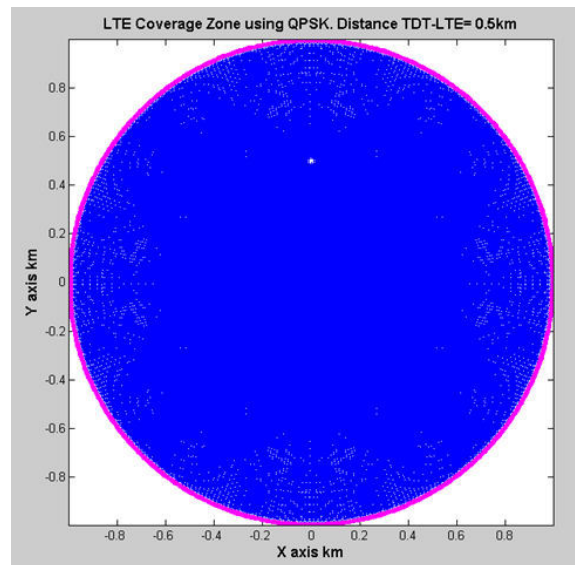


Figura 67. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 500 m

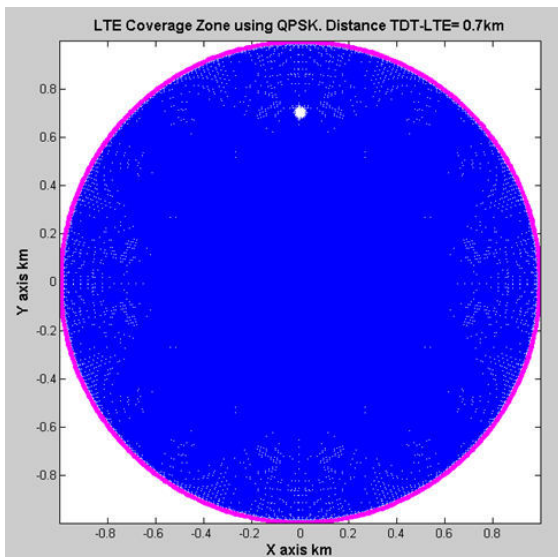


Figura 68. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 700 m

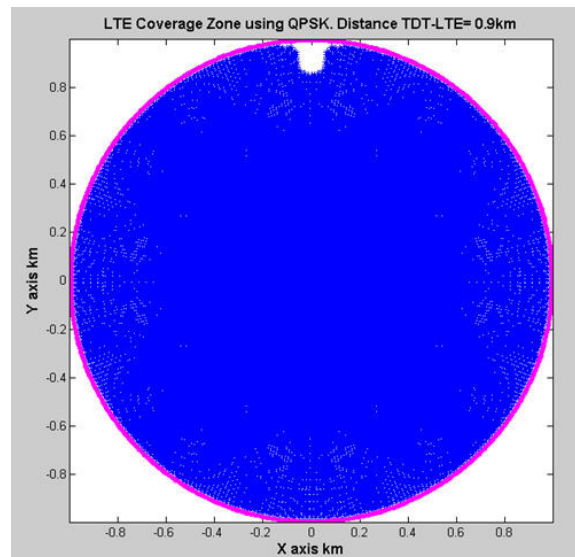


Figura 69. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 900 m

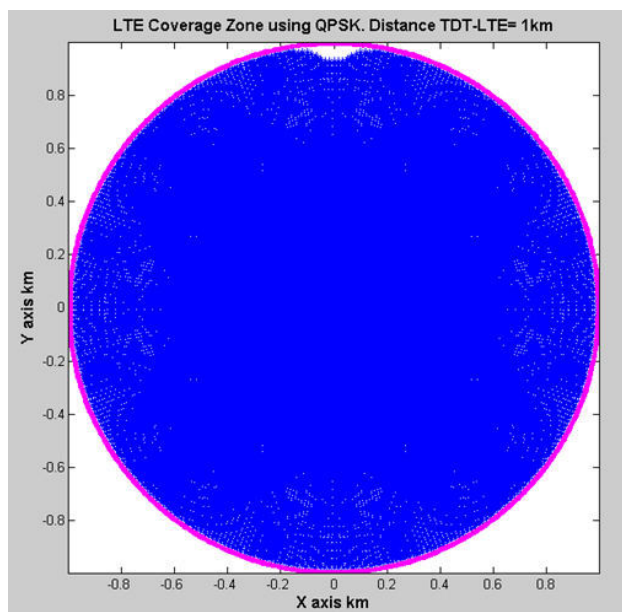


Figura 70. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1 km

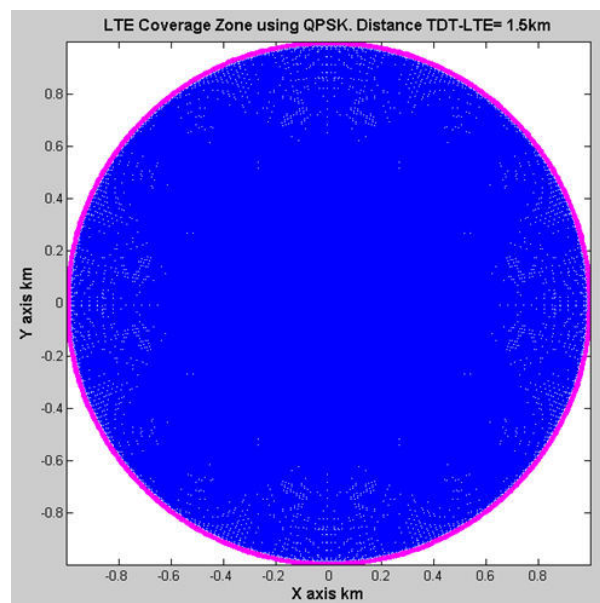


Figura 71. Zona cobertura LTE. Distancia entre estaciones TX: 1.5 km

Como se observa en las imágenes y por lo comentado anteriormente, aunque la banda de frecuencia entre el canal 58 del sistema TDT y el canal A, canal B y canal C del sistema LTE sea mayor que en los apartados anteriores, el mínimo efecto sobre estos sistemas se ha alcanzado en el apartado C.3.

Anexo D: Señal LTE interfiere sobre señal TDT

D.1 Impacto de canal A sobre canal 59

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-53
Filtro RF [dB]	-40.6
Efecto RF-TDT[dB]	-1.2
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 21. Parámetros del efecto del canal A sobre canal 59

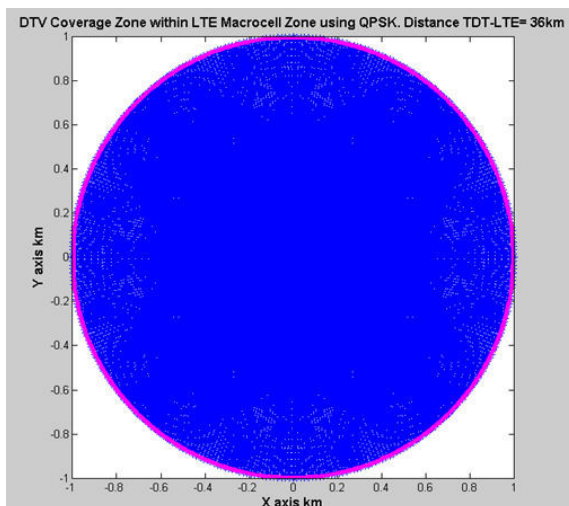


Figura 72. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36km

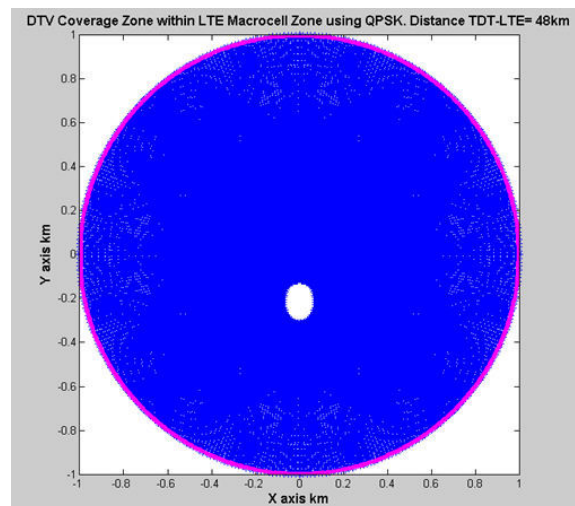


Figura 73. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48km

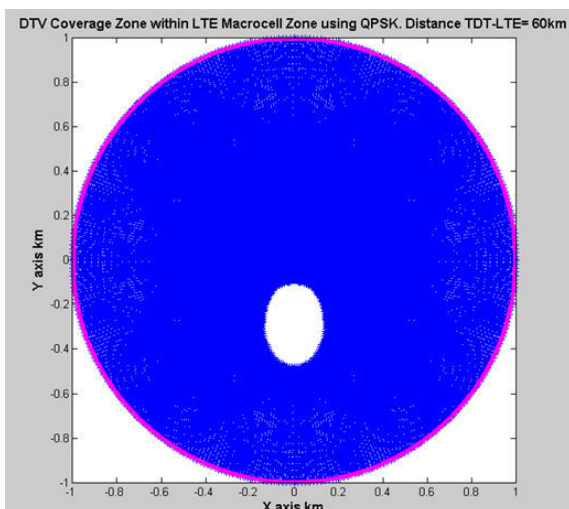


Figura 74. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

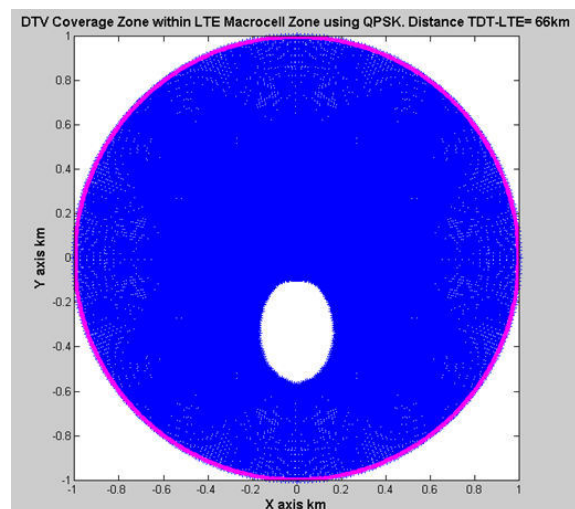


Figura 75. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros de la *Tabla 21* se obtienen las imágenes que se acaban de mostrar y se observa una mejora con respecto al caso anterior debido al aumento de separación que existe entre estos dos canales.

Se observa en las figuras 73 y 74 que cuánto menor es la distancia entre ambas estaciones, el efecto que causan las interferencias que estas estaciones generan sobre los usuarios será cada vez menor y por tanto, la zona de cobertura será cada vez más grande. Ésta es completa aproximadamente a una distancia de 36 km mientras que en el caso anterior esto se observa a 6 km.

Se observa a una distancia de 66 km que mientras que en el caso anterior no hay signos de cobertura en este caso sí que existen bastantes puntos que la tienen.

Las simulaciones se realizan hasta una distancia de 66 km porque es el radio de cobertura máximo del sistema TDT.

D.2 Impacto de canal A sobre canal 58

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-56.7
Filtro RF [dB]	-40.6
Efecto RF-TDT[dB]	0
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 22. Parámetros del efecto del canal A sobre canal 58

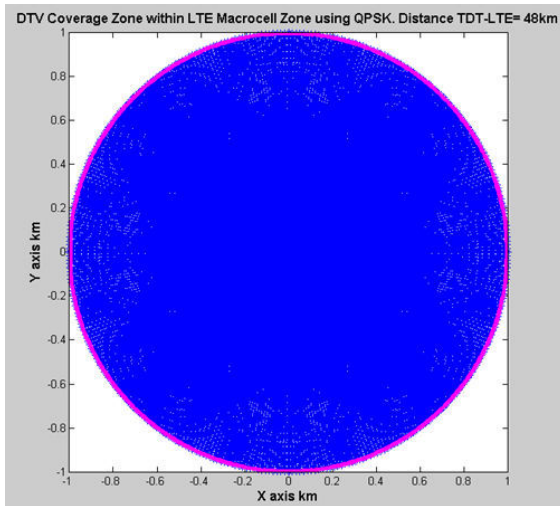


Figura 76. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km

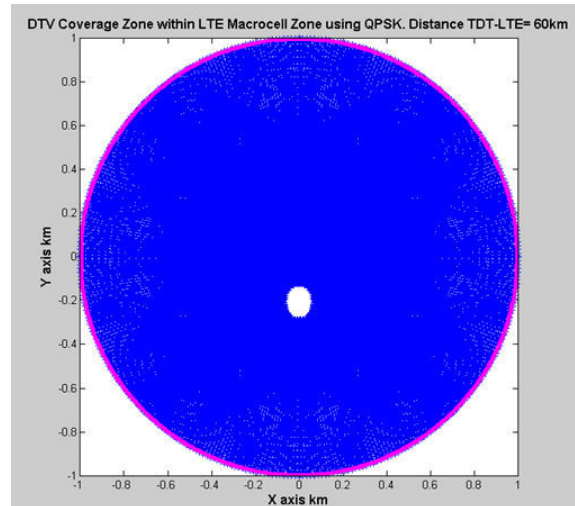


Figura 77. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

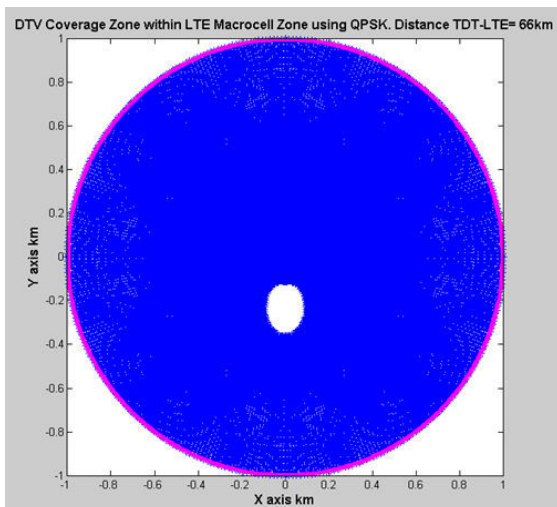


Figura 78. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Según las gráficas se observa de nuevo una mejoría con respecto al caso anterior ya que la separación entre el canal A y canal 58 es de 14 MHz, mientras que la distancia entre el canal A y canal 59 es de 9MHz. Ahora la zona de cobertura es completa cuando la distancia entre ambos sistemas es de 48 km.

D.3 Impacto de canal B sobre canal 60

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-51.4
Filtro RF [dB]	-47
Efecto RF-TDT[dB]	-16.3
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 23. Parámetros del efecto del canal B sobre canal 60

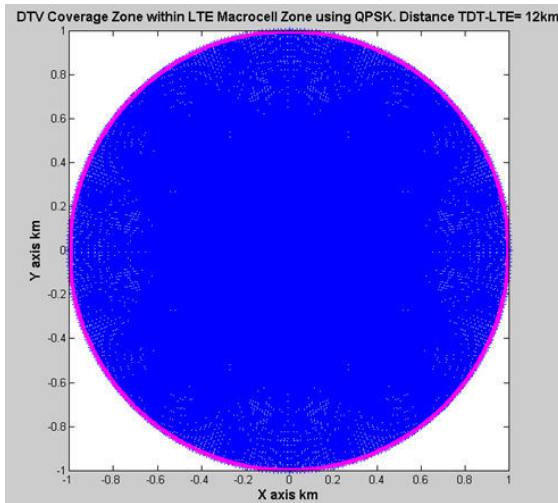


Figura 79. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:12 km

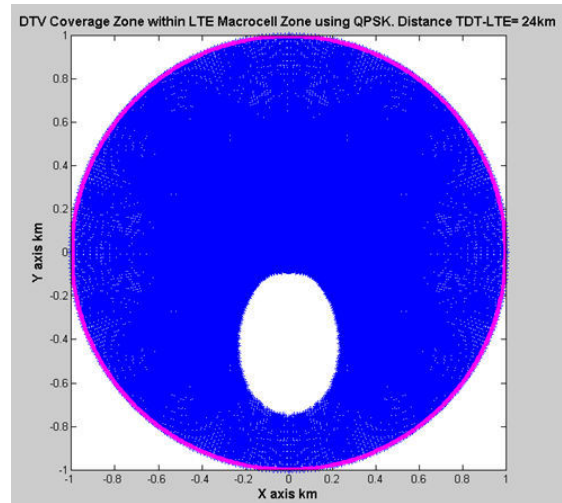


Figura 80. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24 km

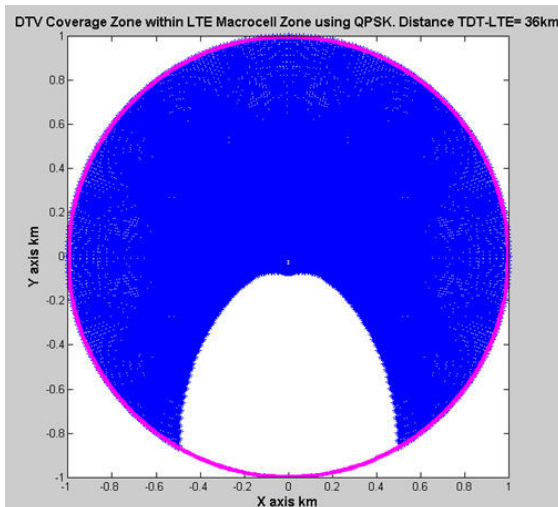


Figura 81. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36 km

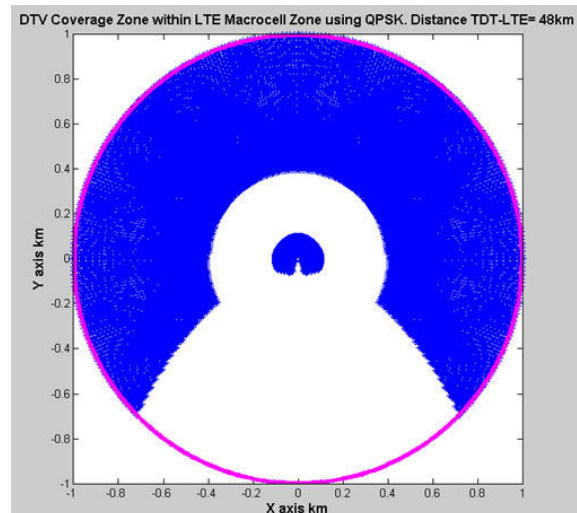


Figura 82. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km

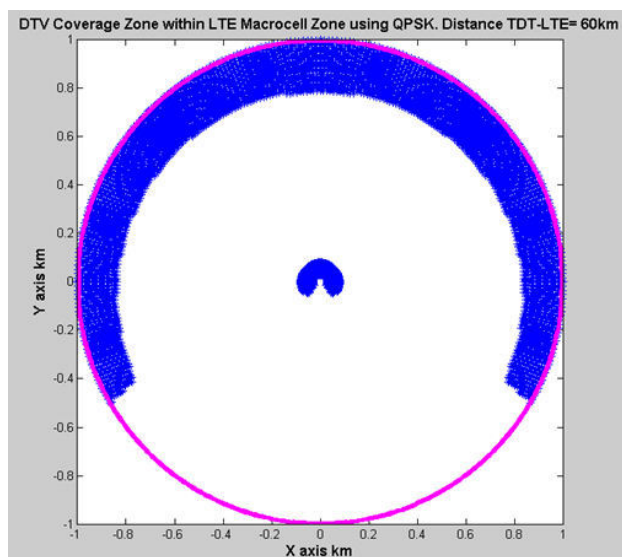


Figura 83. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

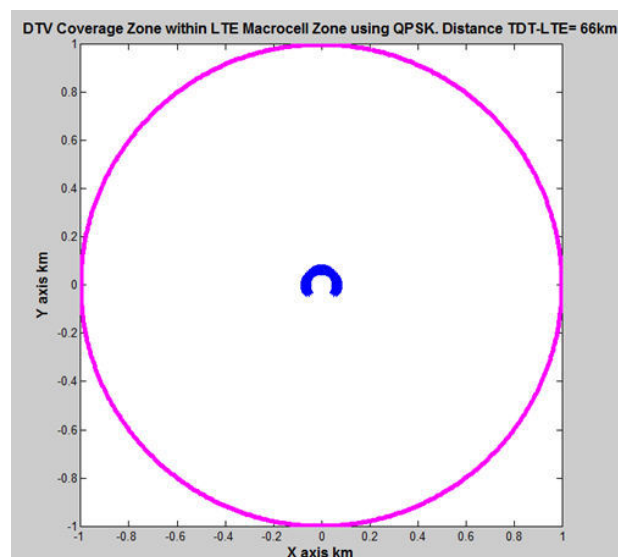


Figura 84. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros mostrados en la *Tabla 23* los resultados que se obtienen son peores que los del apartado D.2 debido a que la separación entre canales es menor. Mientras que en el caso anterior a una distancia de 48 km la zona de cobertura es completa, en este caso a esa misma distancia hay bastantes puntos en los que hay interferencia.

D.4 Impacto de canal B sobre canal 59

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-56
Filtro RF [dB]	-47
Efecto RF-TDT[dB]	-1.2
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 24. Parámetros del efecto del canal B sobre canal 59

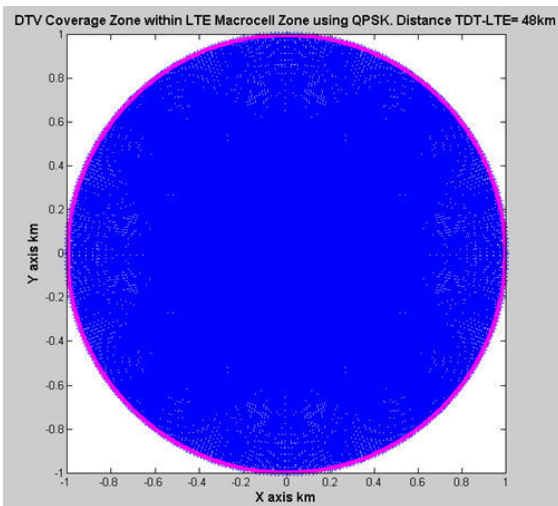


Figura 85. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km

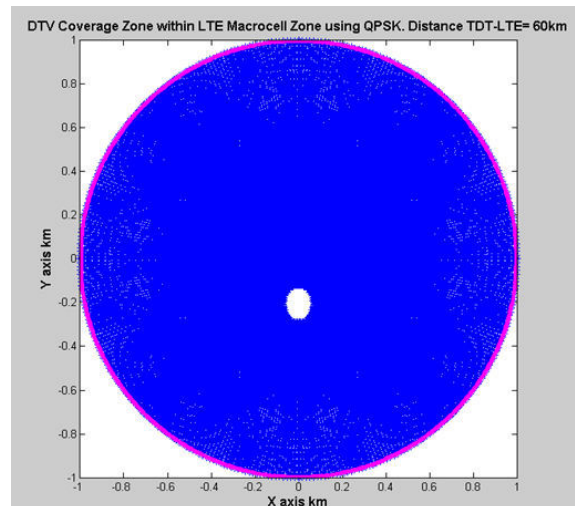


Figura 86. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

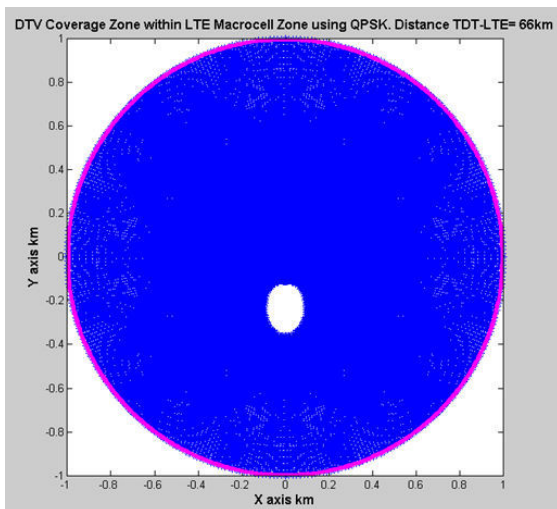


Figura 87. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

En este caso, como la separación entre el canal B del sistema LTE y el canal 59 del sistema TDT es mayor que en el caso anterior, se observa una mejoría con respecto a éste ya que mientras que en el caso anterior a una distancia de 48 km sí que se observan puntos en los que hay interferencias, en este apartado la zona de cobertura es completa a esa misma distancia.

D.5 Impacto de canal B sobre canal 58

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-58
Filtro RF [dB]	-47
Efecto RF-TDT[dB]	0
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 25. Parámetros del efecto del canal B sobre canal 58

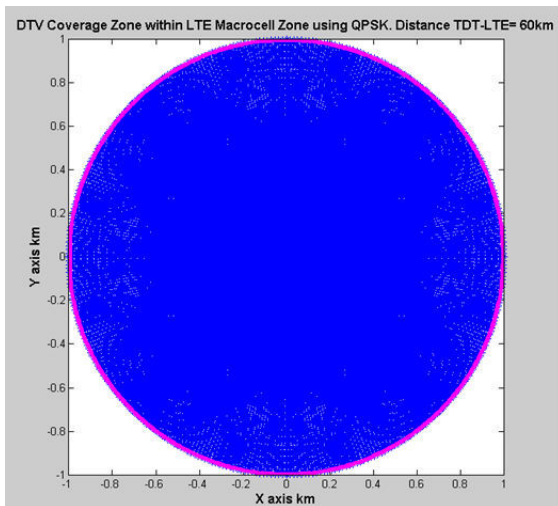


Figura 88. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

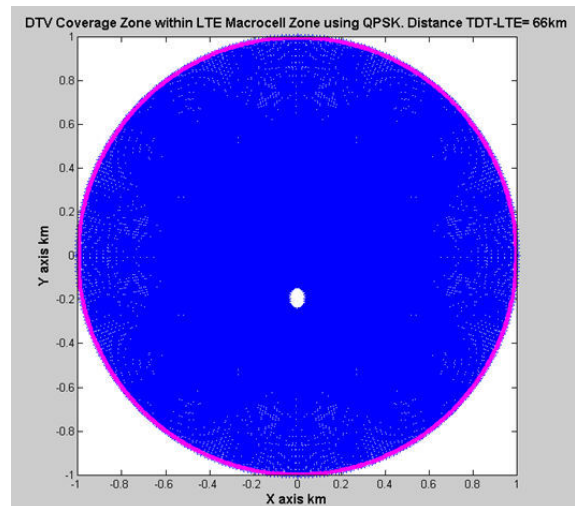


Figura 89. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros mostrados en la *Tabla 25*, se obtienen unos resultados mejores que los del caso anterior ya que la separación entre el canal B del sistema LTE y el canal 58 del sistema TDT es mayor que en el caso anterior. Mientras que en este caso a una distancia de 60 km entre ambos sistemas la zona de cobertura es completa, en el apartado anterior a esa misma distancia se observan algunos puntos con interferencias.

D.6 Impacto de canal C sobre canal 60

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-54
Filtro RF [dB]	-44
Efecto RF-TDT[dB]	-16.3
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 26. Parámetros del efecto del canal C sobre canal 60

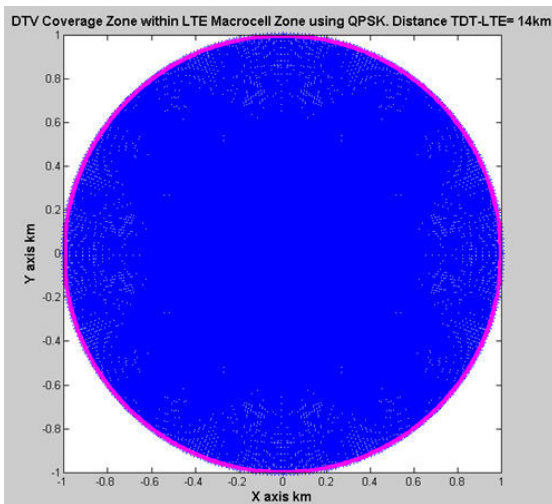


Figura 90. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:14 km

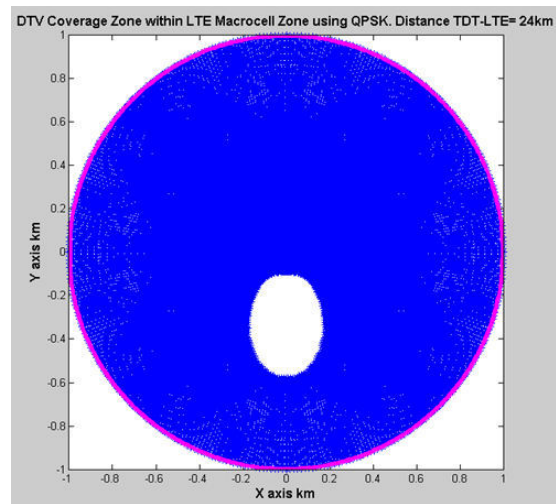


Figura 91. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:24 km

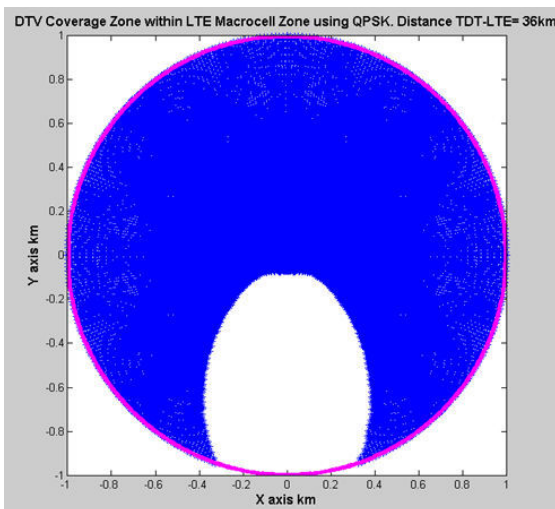


Figura 92. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:36 km

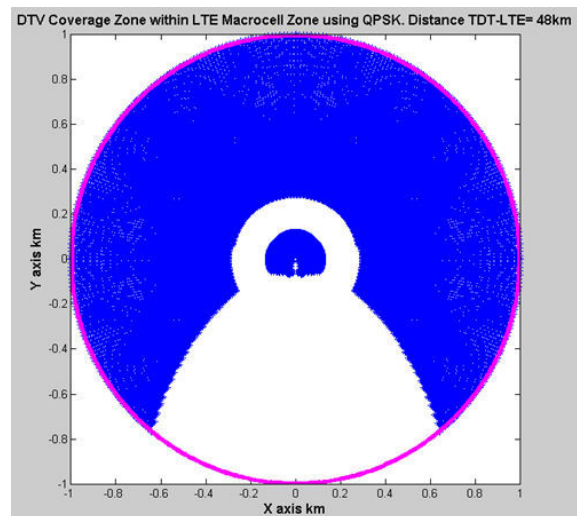


Figura 93. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:48 km

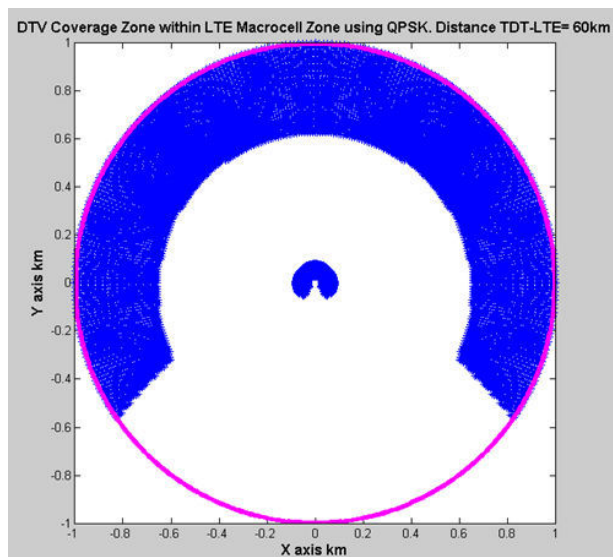


Figura 94. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

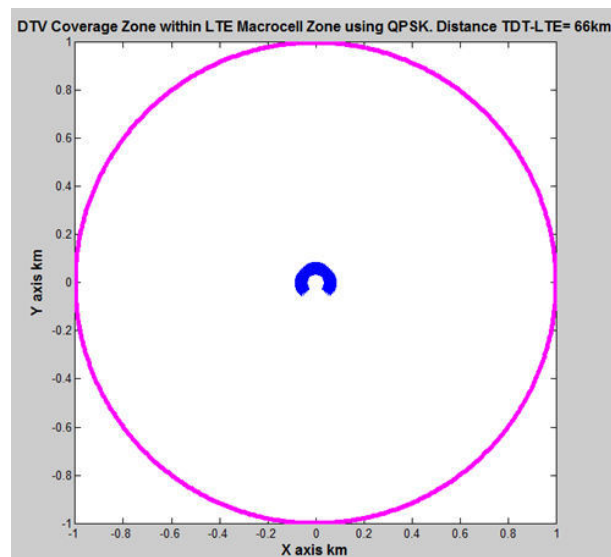


Figura 95. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros de la *Tabla 26* se obtienen unos resultados peores que los del apartado anterior ya que la distancia entre los canales especificados es menor.

D.7 Impacto de canal C sobre canal 59

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-57.5
Filtro RF [dB]	-44
Efecto RF-TDT[dB]	-1.2
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 27. Parámetros del efecto del canal C sobre canal 59

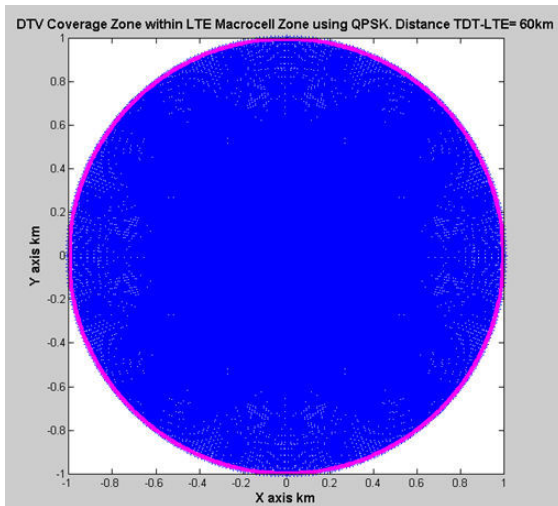


Figura 96. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:60 km

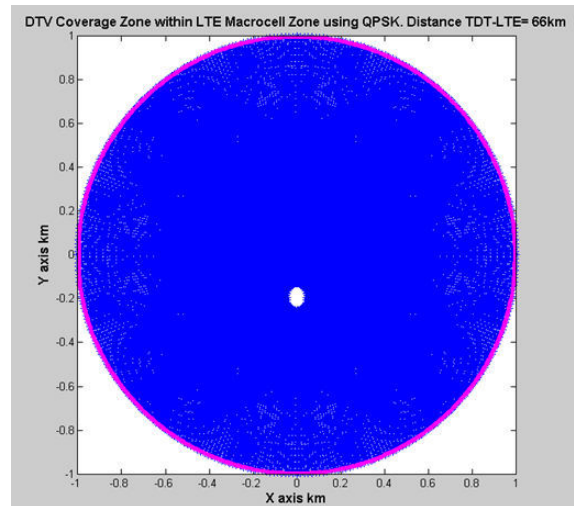


Figura 97. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros de la *Tabla 27* y según las imágenes mostradas, no se observa prácticamente ninguna diferencia entre los resultados de este caso y los del apartado D.5, ya que el *leakage* de este caso y el del comentado es prácticamente el mismo. Se observa que a una distancia de 60 km la zona de cobertura es completa, mientras que en el caso anterior esta zona es completa cuando la distancia entre ambos sistemas es de 48 km. Por tanto, se observa una mejora.

D.8 Impacto de canal C sobre canal 58

Los parámetros empleados y los resultados calculados a partir de este efecto son:

Parámetro	Valor
TX LTE [dB]	-49
Filtro IF [dB]	-59
Filtro RF [dB]	-44
Efecto RF-TDT[dB]	0
SINR QPSK [dB]	7.7

Tabla 28. Parámetros del efecto del canal C sobre canal 58

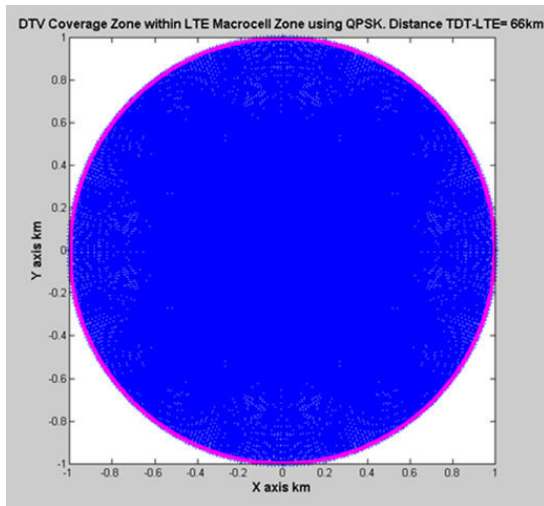


Figura 98. Zona cobertura TDT en macrocelda LTE. Distancia TX:66 km

Aplicando los parámetros de la *Tabla 28*, se obtienen los mejores resultados comparándolos con el resto de casos ya que además de tener el *leakage* más bajo, la separación entre ambos canales es de 27 MHz. La zona de cobertura es completa a una distancia de 66 km.

Si un filtro paso banda, con paso de 791 MHz a 821 MHz y con una bajada de 40 dB en 760 MHz y en 850 MHz, se utiliza en la salida de la estación base LTE, el efecto del sistema LTE sobre TDT disminuye, especialmente sobre los canales 58 y 59 del sistema TDT. La mejora sobre el canal 60 es marginal ya que el efecto que tiene sobre este canal es de muy pocos dBs.

Anexo E: Características antena transmisión TDT

UHF Panel Polarization

470–862 MHz

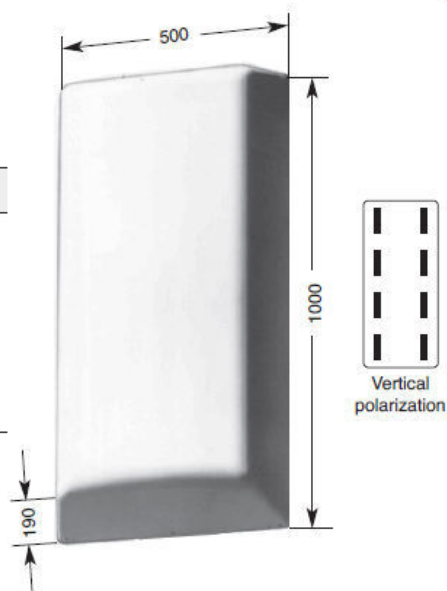
V

KATHREIN
Antennen · Electronic

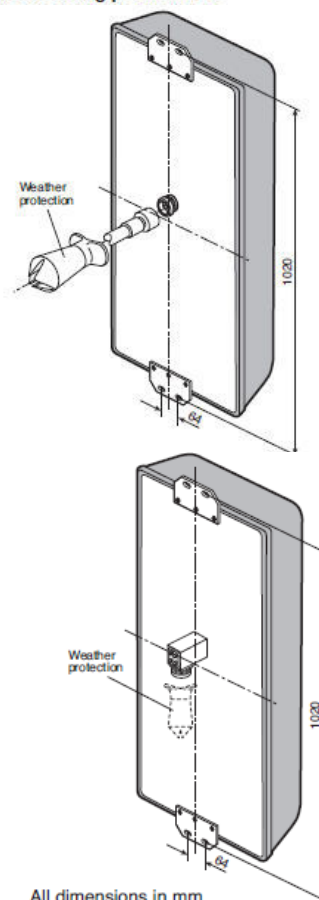
- Designed for open steel spines
- Suitable for transposers

Specifications	
Frequency range	470 – 862 MHz
VSWR	$s < 1.12$
Gain (at mid-band)	11 dBd
Polarization	Vertical
Weight	12 kg
Wind load (at 160 km/h)	Frontal: 565 N Rearside: 815 N Lateral: 250 N
Max. wind velocity	225 km/h

Material:	Reflector screen and dipoles: Weather-resistant aluminum. Protective cover: Fiberglass. Attachment elbow: Hot-dip galvanized steel.
Mounting: (please order separately)	E.g. by using clamps K 61 14 0... to tubular masts of 40 – 521 mm diameter. Further attachment parts and mounting dimensions upon request.
Grounding:	Via mounting parts.
Scope of supply:	Directional antenna with one weather protection unit each for straight connectors and elbow connectors.
Ice protection:	The dipoles remain fully functioning even in icy conditions as the fiberglass cover protects the whole antenna and also the antenna is of a very robust design.
Combinations:	The antenna is particularly suitable for use in combinations in order to achieve various radiation patterns.

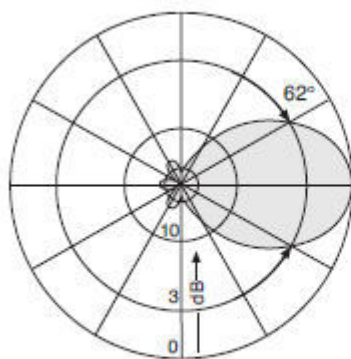


Examples with different connectors and mounting possibilities:

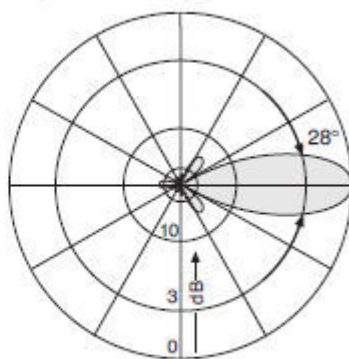


All dimensions in mm

Radiation Patterns (at mid-band)



Horizontal Pattern



Vertical Pattern

Anexo F: Características antena LTE estación base

900 MHz 16dBi 90° Base Station Sector Antenna



Datasheet

Description

Related Products

Electrical Specifications

Model	TPC-0809-16V90
Frequency Range-MHz	806-960
Gain-dBi	16
VSWR	≤1.5
Polarization	Vertical
Horizontal Beamwidth-°	90
Vertical Beamwidth-°	8
F/B Ratio-dB	≥25
Impedance-Ω	50
Maximum Power-W	200
Lightning Protection	DC Ground

Mechanical Specifications

Connector	7/16DIN Female
Dimension-mm	2422×290×130
Weight-Kg	18
Cover Material	UV Resistance PVC
Mast Diameter-mm	Φ40~Φ70
Rated Wind Velocity-m/s	60
Working Temperature-°C	-40~+60

Anexo G: Modulación según SINR mínima (LTE)

MCS	SINR(min) (dB)	DL cell throughput (Mbps)
QPSK 1/3	-0.75	4.00
QPSK 1/2	1.50	6.00
QPSK 2/3	3.50	8.00
16QAM 1/2	7.00	12.00
16QAM 2/3	9.50	16.01
16QAM 4/5	11.50	19.20
64QAM 1/2	11.50	21.0
64QAM 2/3	14.7	24.01

Tabla 29. Modulación según SINR mínima (LTE)

Anexo H: Modulación según SINR mínima (DTV)

Modulation	Code rate	SINR (dB)
QPSK	1/2	3.1
QPSK	2/3	4.9
QPSK	3/4	5.9
QPSK	5/6	6.9
QPSK	7/8	7.7
16-QAM	1/2	8.8
16-QAM	2/3	11.1
16-QAM	3/4	12.5
16-QAM	5/6	13.5
16-QAM	7/8	13.9
64-QAM	1/2	14.4
64-QAM	2/3	16.5
64-QAM	3/4	18.0
64-QAM	5/6	19.3
64-QAM	7/8	20.1

Tabla 30. *Modulación según SINR mínima (TDT)*